



TITLE:

持続および繰返し荷重下における
コンクリートの塑性的挙動に関する
基礎的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

阪田, 憲次

CITATION:

阪田, 憲次. 持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性的挙動に関する基礎的研究. 京都大学, 1976, 工学博士

ISSUE DATE:

1976-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r3198>

RIGHT:

持続および繰返し荷重下におけるコンク
リートの塑性的挙動に関する基礎的研究

昭和51年 6 月

阪、田 憲 次

持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性的挙動に関する基礎的研究

昭和51年 6 月

阪 田 憲 次

目 次

第1章 緒 論	1
1.1 序 論	1
1.2 本論文の概要	2
第2章 概 論	5
2.1 コンクリートの乾燥収縮およびクリープとその生成機構	5
2.2 持続高応力下におけるコンクリートのクリープ現象	8
2.3 高サイクル繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労現象	10
＜参 考 文 献＞	13
第3章 コンクリートの乾燥収縮の生成機構に関する研究	21
3.1 概説と研究目的	21
3.2 実験計画および実験方法	22
3.3 コンクリートの乾燥収縮の環境湿度依存性	22
3.4 コンクリート中の水分の逸散機構についての考察	24
3.5 拡散方程式によるコンクリート中の水分逸散に関する考察	25
3.6 乾燥収縮と逸散水量との関係と乾燥収縮の生成機構についての考察	35
3.7 結 論	36
＜参 考 文 献＞	38
第4章 コンクリートのクリープの生成機構に関する研究	63
4.1 概説と研究目的	63
4.2 コンクリートのクリープの生成機構に関する諸説の検討	64
4.3 実験計画および実験方法	68
4.4 実験結果	69
4.5 環境の湿度がクリープにおよぼす影響	71
4.6 コンクリート中の水分の逸散とクリープひずみとの関係	72

4.7	コンクリートのクリープの生成機構に関する一考察	74
4.8	結 論	77
	<参 考 文 献>	79
第5章	持続高応力下におけるコンクリートのクリープ現象に関する研究	99
5.1	概説と研究目的	99
5.2	実験計画と実験方法	99
5.3	コンクリートのクリープ破壊とその変形特性	100
5.4	コンクリートのクリープ破壊の確率論的性質	104
5.5	破壊に要する時間(寿命)の分布とクリープ限	106
5.6	結 論	108
	<参 考 文 献>	110
第6章	高サイクル繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労現象に関する研究	137
6.1	概説と研究目的	137
6.2	疲労試験における統計的処理法	138
6.3	実験計画と実験方法	140
6.4	コンクリートの疲労試験結果と疲労寿命の分布	141
6.5	S-N線図と200万回疲労強度	142
6.6	コンクリートの疲労特性	143
6.7	高サイクル繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性	146
6.8	結 論	148
	<参 考 文 献>	150
第7章	結論および謝辞	173

第 1 章 緒 論

1.1 序 論

コンクリートは数々のすぐれた特徴を有し、鉄鋼とともに建設材料には欠くことのできないものである。それとともに、重量が大きいこと、圧縮強度に比べ引張強度が小さいことなどの欠点をも有している。しかしながら、重量の大きいことを利用した構造物もあり、これらの欠点がいかなる場合にも不利なものであるというわけではない。また、人工軽量骨材の出現、新しい混和剤の開発、ならびにプレストレストコンクリート構造の利用など、新材料の開発、構造様式の発達などにより、従来コンクリートの欠点とされていた点は著しく改善されており、それにともなう以前には考えることのできなかつたコンクリート構造物すら出現するにいたっている。いずれにしろ、強度、耐久性、経済性等を考慮すれば、建設材料としてのコンクリートの占める役割は、今後も不動のものであると思われる。

一方、地震、風水害等の苛酷な自然環境のもとに置かれた狭小な国土において、活発な経済活動が営まれているわが国の現状を考えると、それを支える社会基盤の整備が切望されているといえる。それらに対処するためには、国土の有効な利用をはかるとともに、輸送機関の高速化、多様化が必要であり、この要請に応えるのが、高層建築、海洋構造物、長大橋および高速道路、鉄道等の出現である。また、新しい構造物の出現によって技術的にも種々の問題提起が行われている。すなわち、ポンプ打設やプレハブ化など施工上の問題、海水による鉄筋の錆化とコンクリートの劣化の問題、太径鉄筋や各種混和剤の開発等の新材料の出現に伴う諸問題、列車の運行回数の増加と自動車交通量の増大に伴う繰返し荷重、衝撃荷重下におけるコンクリートの諸特性に関する問題、新しい形式の鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートの開発に関する問題など、解決しなければならない問題が山積しているように思われる。

これらの問題に対処すべく、フレッシュコンクリートの研究、海洋コンクリートの研究、新材料、新工法に関する研究等が、内外の研究者によって意欲的になされており、その成果が実際に適用されつつあるのが現状である。しかしながら、多種多様なコンクリート構造物が出現し、その構造物が施工される環境の範囲の拡大と苛酷化の現状を考えると、上述のような、個々の問題点に対する検討のみならず、コンクリートの有する諸特性を、その基礎より総合的に検討することの重要性が、あらためて認識されるべきであろう。

近年、コンクリートを多相複合材料を考え、その材料特性を検討しようとする気運がみられるが、このような傾向は、多種多様化したコンクリートを、再度その基礎から検討し直そうとする

試みに他ならない。

設計の面においても、従来の許容応力度法から終局強度設計法へと移行する趨勢にあるが、その場合においても、複合材料としてのコンクリートの力学的挙動の正しい理解と、終局状態における強度、変形等の統計資料の蓄積なしには、その正しい適用は望めない。

終局強度設計においては、部材の破壊に対する抵抗性、すなわち強度、破壊特性を明確にする必要がある。また、構造物の安全性は、構造物に作用すると考えられる種々の荷重に対する安全率、すなわち荷重係数によって確保されるため、構造物の耐用期間中に加えられる荷重の種類と大きさに関する統計資料の蓄積とそういった荷重下におけるコンクリートの変形、破壊特性の検討が望まれるのである。

このような現状を考え、本研究においては、コンクリート有する変形、破壊特性の一端を探り挙げて検討する。コンクリートの変形と破壊については、解決すべき種々の問題点があるが、本研究は、従来設計の面においては二義的にしか問題にされなかった乾燥収縮やクリープなどの時間的な塑性変形と、持続および繰返し荷重下における破壊、すなわちクリープ破壊や疲労破壊について、その生成機構を材料特性との関連において明らかにすることを目的とするものである。

1.2 本論文の概要

本論文は、コンクリートの乾燥収縮およびクリープなどの時間的な塑性変形の生成機構とクリープ破壊および疲労破壊に関して論じたもので、7章からなっている。

まず、第2章においては、コンクリートの乾燥収縮、クリープ、クリープ破壊および疲労に関する従来の研究のうち、直接本論文に関係するものについて概説し、本論文の糸口を示す。

第3章は、コンクリートの乾燥収縮の生成機構を明らかにすることを主眼として行なった研究について述べる。すなわち、コンクリートの乾燥収縮を論じる場合の重要な要因の一つと考えられるコンクリート中の水分の挙動に着目し、乾燥に伴う水分の逸散の時間的な変化を観察し、その機構の特性を考察する。また、コンクリート中の水分の逸散が拡散方程式で表わされると仮定し、3次元の拡散方程式の解を求め、実験で得られた逸散水量と時間の関係より、拡散係数と表面係数を決定するとともに、コンクリート中の水分の乾燥に伴う逸散機構について検討する。このようにして得られたコンクリート中の水分の逸散機構と乾燥収縮ひずみを比較するとともに、コンクリートの乾燥収縮の生成機構について言及する。

第4章は、静的強度の30%程度の低持続応力下におけるコンクリートのクリープ変形を、その生成機構と関連づけて論じたものである。まず、コンクリートのクリープの原因として従来より提唱されている諸説を探り挙げ、それぞれの長所あるいは欠点を検討し、本研究において検討

すべき説を決定する。つぎに、吸水量の異なる3種類の骨材を用いたコンクリートにつき、圧縮クリープ試験を行ない、逸散水量とクリープひずみとの関係、クリープひずみにおよぼす環境の湿度条件の影響について明らかにするとともに、クリープの生成機構に関する有力な説の一つであるシーページ理論について検討する。さらに他の諸説をも検討し、クリープひずみを生成機構との関連においてある程度定量的に分類することを試みる。

第5章は、破壊の面から見たコンクリートのクリープ現象を明らかにするために行なった研究について述べるものである。すなわち、静的破壊強度の70～95%程度の高持続応力下におけるコンクリートの時間的な変形挙動を観察し、クリープひずみ一時間曲線の特性を論じる。また、破壊に要する時間などのクリープ試験における測定値は著しくばらつくことがみとめられるのでそれらの測定値を統計的な手法を用いて処理するとともに、測定値の確率分布をもとにして、確率過程としてのコンクリートの破壊機構について考察する。

持続荷重に対するコンクリートの耐久限度、すなわちクリープ限は、未だ確定されていないが、クリープ限の存在することを明らかにし、それを確率的に決定することも試みる。

第6章は、第5章において得られた持続応力下における変形と破壊に関する知見をもとにして、その延長として繰返し荷重下におけるコンクリートの変形と破壊について論じる。

コンクリートの疲労破壊現象は、クリープ破壊と同様、一種の確率過程の問題であるとの観点に立ち、破壊に要する荷重繰返し数、すなわち疲労寿命の分布を求め、それと金属材料および岩石の疲労寿命の分布とを比較し、コンクリートの疲労破壊特性を明らかにする。また、コンクリートのS-N線図、200万回疲労強度および普通コンクリートと軽量コンクリートの疲労破壊特性についても考察する。さらに、持続荷重下および繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性の相違点および類似点についても言及するつもりである。

第7章においては、第3章より第6章までに得られた結果を総括するとともに、今後の問題点を述べ、本論文の結論とする。

第2章 概 論

以下に本論文の内容に関係する既往の研究結果について述べる。

2.1 コンクリートの乾燥収縮およびクリープとその生成機構

コンクリートの乾燥収縮およびクリープに関する研究は、Woolsonが1905年にコンクリートの流動について報告したのに始まるといわれている。¹⁾それ以来、内外の数多くの研究者によってこの種の問題が議論され、今日にいたっている。

コンクリートの乾燥収縮およびクリープに影響をおよぼす要因は数多く挙げられ、大略つぎに示すようなものが考えられる。

1. コンクリートそのものの性質に関するもの
 - a) 骨材(種類, 物理的性質, コンクリート中に占める体積率)^{2)~8)}
 - b) セメントと水(セメントの種類および物理的性質, コンクリート中に占めるセメントペーストの量, 水セメント比)^{9)~12)}
 - c) 混和材料^{6), 10), 13)~16)}
2. 練混ぜ時間と締固め方法¹⁷⁾
3. 実験時のコンクリートの状態(材令, 水和の程度, 養生方法, 含水量)^{18)~21)}
4. 持続応力の種類と大きさ^{11), 19), 22)~28)}
5. 環境条件(温度, 湿度, 空気の流れ)^{11), 29)~32)}
6. 供試体の形状, 寸法³³⁾

以上に示した文献2)~33)の個々について紹介することは割愛するが、これらの要因のうち、コンクリートの乾燥収縮やクリープの生成機構を論じる際に重要なものは、コンクリートの含水量や環境の湿度条件などであると思われる。すなわち、乾燥状態におけるコンクリートや持続応力下におけるコンクリートの有する水分の挙動が重要な要因である。

一般に、コンクリート中の水分は、その存在形態によって、(1)化学的結合水、(2)セメントゲル中のゲル水、(3)毛細管吸き中のキャピラリー水および(4)骨材中の水の4種類に分類される。³⁴⁾これらの水のうち、コンクリートの乾燥収縮やクリープに直接の影響をおよぼすのは、セメントゲル中に拘束されて存在するゲル水である。

³⁵⁾HobbsとMearsは、コンクリート中の水分に着目し、乾燥収縮の生成機構についてつぎのように述べている。

コンクリート中には相互に連結された種々の大きさの空げきが存在する。このようなコンクリートが乾燥されると、水分は比較的大きな毛細管のメニスカス表面から除々に蒸発し始める。水分の蒸発によってメニスカスの曲率が増大し、それに伴って生じる毛細管張力によって、骨材中の水分やセメントペースト中の大きな空げき中のキャピラリー水が水分を失なった毛細管空げきへ移動する。このような過程を繰返しつつ乾燥が進行すると、コンクリート表面に近いコンクリート内部の湿度は十分に低くなり、その結果、すでに水分を失なった比較的大きな空げきの壁面や、メニスカスがコンクリート内部へ後退することによって露出してきたゲル空げきからも水分が失われるようになる。さらに乾燥が進行すると、比較的大きな毛細管空げきのメニスカスは失われ、水分の逸散は、コンクリート表面と内部との湿度勾配にのみ起因するようになる。

以上述べたごとく、コンクリートの乾燥収縮の生成機構は、巨視的に見れば、コンクリートと環境との湿度勾配に起因するシーページ効果によって説明される。

コンクリートのクリープの生成機構についても、乾燥収縮と同様、シーページ理論によって説明される。すなわち、持続応力によってセメントゲル中のゲル水が圧出され、それによって起こるゲルの収縮が体積変化を起こす(すなわちクリープさせる)ことの原因である³⁴⁾というのである。しかし、後に詳しく論じるように、このシーページ理論で説明されることもコンクリートのクリープの原因の一つではあろうが、これだけでコンクリートのクリープのすべてを説明できないことも事実である。

コンクリートのクリープの生成機構については、従来から多くの説が提唱されている。³⁶⁾現在までに提唱されている代表的なクリープの生成機構説は、(1)シーページ理論あるいはゲル説(Seepage or Gel theory)、(2)遅延弾性説(Delayed elasticity)、(3)クラックに起因する変形(Cracking deformation)、(4)結晶のすべりあるいは塑性変形説(Plastic theory)、(5)粘性流動説(Viscous theory)、最大安定への傾向、力学的変形説(Mechanical deformation theory)、(7)不均一な乾燥収縮(Non-uniform shrinkage)などである。これらの各説の詳細については第4章で検討するが、各説単独では、クリープ現象のすべてを満足に説明できないが、各説のいずれをも全面的に否定することもできない。したがって、コンクリートのクリープ現象は、上述した種々の要因が重なり合って起こると考えるのが妥当であろう。

なお、コンクリートの乾燥収縮とクリープの生成機構に関する従来の研究は、その大部分が定性的なもので、定量的に明らかにしたものは、きわめて少ないようである。

一方、コンクリートの乾燥収縮やクリープを熱力学的な観点から、物理数学的な手法を用いて検

討しようとする試みが、古くからなされてきた。

³⁷⁾
Pickett は、コンクリート中の水の移動が蒸気の拡散によるものであり、またコンクリート中の水分の蒸気圧が含水量に比例し、浸透性が含水量に無関係であるならば、水の移動に対する微分方程式は、拡散方程式または熱伝導方程式として知られている偏微分方程式となるという仮定のもとに、式(2.1)を導入した。

$$\frac{\partial s}{\partial t} = K \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

ここに、S：乾燥収縮ひずみ

K：収縮の拡散係数

式(2.1)を、境界において熱伝導におけるNewtonの輻射の法則を適用することにより、境界値問題として解き、さらにひずみと応力の関係がフックの法則に従うとして、収縮によるコンクリートの内部応力を求めている。同様の試みをソイルセメントの収縮による内部応力を求めるために適用したものとして、岡田と川村の研究がある。³⁸⁾

Pickettの仮定と式(2.1)をみると、コンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮ひずみとの関係は、まったく一義的に定まるとしており、換言すれば、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリート中の水分の外部への逸散量に比例するとしている。

³⁹⁾
吉田は、硬化したセメントペーストないしはコンクリートの乾燥による水分の消失を、逸散という単一の現象とみなし、円柱供試体における水分の逸散を、式(2.2)で仮定した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

ここに、 θ ：逸散性水分濃度

a：水分の拡散係数

また、水分の逸散量と乾燥収縮ひずみは、Pickettと同様、一義的に定まるとしている。拡散係数についても、乾燥の進行にかかわらず、0.10 cm/day、一定であるとしているが、それに対する実験的な裏付けはない。まったく同様の研究が、Becker と Macinnis⁴⁰⁾によってもなされている。

以上に述べたPickett、吉田およびBeckerらの研究は、水分の逸散についての実験的な検討が十分でないこと、水分の逸散と収縮ひずみとが比例すると仮定していることなど、検討すべき問題点もあるが、乾燥収縮の生成機構を論じる上では示唆に富んだ研究であると考えられる。

コンクリートのクリープの生成機構については、乾燥収縮の場合と異なり、前述のような諸説があることから明らかなように、簡単な理論によって論じることは必ずしも容易なことではない。従来の研究においては、クリープの生成機構を定性的に説明するものが大部分であるが、

最近、コンクリートのクリープを熱力学的な観点から検討しようとする試みが、Neville⁴¹⁾らやBažant⁴²⁾によって行われている。

Nevilleらは、水和したセメントゲル粒子間に存在する吸着水の挙動を熱力学的に検討し、図-2.1に示すようなレオロジーモデルを用いてコンクリートのクリープを説明している。

すなわち、ゲル構造の弾性を表わすスプリング S_1 、ゲル粒子間の吸着水の力のリンクの破断を表わすダッシュポット D_1 および吸着水の粘性変形を表わすダッシュポット D_2 よりなる粘性変形要素、荷重方向と直角な固体表面をもつ吸着層を表わす吸着細胞 C_1 と荷重方向と平行な表面をもつ細胞 C_2 とからなる湿分拡散要素ならびに水和していないセメントペーストの弾性要素の並列な三つの要素により、セメントペーストのクリープ挙動を説明している。なお、湿分拡散要素の二つの吸着細胞は互いに連結されており、吸着水の有する自由エネルギーの平衡を保つように湿分拡散が起こるとしている。

Bažantは、コンクリートのクリープ現象をつぎのように説明している。硬化したセメントペーストは非常に多くの内部境界面を有し(約 $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)、それらの固体界面間に拘束された状態でゲル水の水膜が存在する。このような水膜は妨げられた吸着層(hindered adsorbed layer)と呼ばれている。その水分子は、拘束している固体の界面によって強力に引きつけられており、分離圧と呼ばれる、大きな、層の厚さ方向の垂直応力を伝達することができ、材料が受けた荷重を分担する役割を果たしている。さらに、これらの水の分子は層にそって拡散することができる。このような拡散あるいは物質移動による層の厚さの変化が、コンクリートの低持続応力下における時間依存変形(クリープ変形)であると考えられる。このような観点より、Bažantは、有限な厚さを有する界面間の吸着層について熱力学的な考察を行ない吸着層の非弾性応答を記述する方程式を導いている。さらに、この方程式で表わされる挙動を、図-2.2に示すレオロジーモデルで表わすことによって、微視的構造の時間依存現象を材料の巨視的な挙動に結びつけようとしている。

以上に述べたNevilleらやBažantの研究は、コンクリートの巨視的なクリープ挙動を、レオロジーモデルによって表わすことにより、その内部機構を検討する従来の方法とは逆に、セメントペーストの微視的構造における物理的な挙動の理解にもとづくレオロジーモデルを導入することにより、巨視的なクリープ挙動を予測しようとするものである。

2.2 持続高応力下におけるコンクリートのクリープ現象

前節で述べたごとく、比較的低い持続応力下におけるコンクリートのクリープ現象については、多くの研究者によって検討されているが、静的破壊強度近くの高持続応力下におけるクリープ挙

動については、ほとんど解明されていないのが現状である。これは、許容応力設計においては、クリープ破壊を起こすような高応力は問題にならないこと、実験を行なってもその結果のばらつきが大きく、取扱いが難しいことなどによるものと思われる。

コンクリートのクリープ破壊に関する従来の研究を総合すると、高持続応力下におけるコンクリートのクリープ挙動は、金属やポリマーなどと同様の傾向を示すようである。すなわち、コンクリートのクリープ曲線は、(1)最初の瞬間的な弾性ひずみ、(2)クリープ速度が時間とともに減少する遷移クリープ部分、(3)クリープ速度が時間に無関係に一定かつ最小の定常クリープ部分、および(4)クリープ速度が次第に増大してついに破壊する加速クリープ部分の4段階に分けられる。ただし、測定条件によっては上記の区別が明確でない場合もあり、従来の研究においても、そのような例がしばしば見られる。

クリープ破壊曲線の第1段階として現われる遷移クリープ部分は、時間的に見てももっとも大きな部分を占めており、曲線の形状も概して規則的であり、同一測定条件のもとでは、かなり一致したものになるといわれている。⁴³⁾ またそれは低持続応力下におけるクリープ曲線と類似しており、この遷移クリープを遅延変形過程と考え、その力学モデルは、スプリングとダッシュポットからなるケルビン要素によって表わされるとしている。^{44), 45)}

定常クリープの段階においては、クリープ速度は一定かつ最小となり、クリープ量も遷移ないしは加速クリープ部に比較してかなり小さく、場合によってはほとんど観測できないこともある。この定常クリープは、単なる遅延変形とは異なり、本質的に回復不能の定常流動を含んでいるが、⁴⁴⁾ 加速クリープのように、破壊クラックの発生する段階には達していないと考えられており、堀は、この定常流動をセメントペースト中のゲルの粘性流動によるものとしている。さらに、定常クリープ速度が載荷応力の指数関数もしくは巾関数で表わされることを明らかにしている。すなわち、定常クリープ速度は、載荷応力によって一義的に定まると考えている。⁴⁵⁾

桜井は、定常クリープ速度の逆数と破壊までの時間との間に直線関係があることを明らかにしている。⁴⁶⁾ 定常クリープ速度と破壊に要する時間との関係については、石川らや小柳らによっても検討されている。⁴⁸⁾

加速クリープは、定常クリープに続いて現われるクリープ曲線の最終段階であって、クリープ速度が一定かつ最小値から次第に増大して破壊にいたる。この加速クリープ部分は、同一の測定条件のもとでも、個々の供試体によってその様相が著しく異なることがみとめられており、これを系統的に取扱うことはきわめて困難である。⁴⁴⁾ 堀は、3等分点荷重による曲げクリープ破壊試験において、応力条件が同一の4個の供試体のクリープ破壊曲線を求め、瞬間的な弾性ひずみおよび遷移クリープがまったく同一であるにもかかわらず、定常クリープおよび加速クリープの持続

時間、ひずみ量などがかなり異なることを示している。これは、定常クリープから加速クリープへと遷移する現象、換言すれば、破壊クラックの発生が、実験条件によって一義的に決められるものではなく、確率的なものであることを示すものと考えられる。このような現象は金属材料においてもみとめられ、この種の現象が確率的に検討されるべきであることを示している。⁴⁹⁾

一方、コンクリートのクリープ限が存在するかどうかということも興味ある問題である。コンクリートのクリープ限については、Lyseが静的強度の80%、Richart, Jensenらが80~90%、Shankが90%、Rüschが75%、Shellが70%さらに坂が76%であると述べているが、必らずしも確定的なものではない。⁴⁹⁾ 石川らは、クリープ限を77%と考えているが、それは、載荷応力と破壊までの時間との関係を求め、それから得られる $t=10$ 年における時間強度のことである。⁴⁶⁾

クリープ破壊の問題は、金属材料やコンクリートだけでなく、土質工学の分野においても検討されている。一般に、軟弱な粘土地盤上に構造物や盛土を築造する場合、圧密沈下とともに、クリープによる地盤の変形が生じる。とくに急激な築造が行なわれる場合には、非排水状態での大きなクリープ変形が生じる。しかも土載荷重が一定限度以上に大きい場合には、クリープ破壊が生じる。⁵⁰⁾ このような点に注目し、栗原は、粘土の非排水状態でのクリープ破壊特性についての研究を行ない、粘土のクリープ破壊曲線においても、遷移クリープ、定常クリープおよび加速クリープの3つの部分に分けられること、定常クリープ速度と破壊時間との間には密接な関係があることなどを明らかにしている。

2.3 高サイクル繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労現象

コンクリートの疲労特性に関する研究については、Murdoch, NealとKesler, Norby⁵¹⁾ およびRaithbyとWhiffin⁵²⁾ などによってかなり詳しく検討され紹介されている。⁵³⁾

ここでは、本研究と直接関連のあるプレーンコンクリートの圧縮疲労特性に関する研究についてその概要を述べる。

コンクリートの疲労に関する本格的な研究は、1903年にVan Ornamによって最初になされた。⁵⁴⁾ 材令4週のセメントペースト供試体を用いて、載荷速度4 cpmの低速圧縮疲労試験を行ない、コンクリートのような脆性材料においても、金属材料と同様に、静的強度以下の荷重の繰返しによって破壊する性質があることを明らかにしている。さらに、材令1ヶ月（静的強度： 87 kg/cm^2 ）および1年（静的強度： 110 kg/cm^2 ）の角柱供試体179本について、圧縮疲労試験（載荷速度：2~4 cpm）を行ない、繰返し荷重下におけるコンクリートの応力ひずみ曲線が、最初上に凸な状態から、繰返し回数が増加するにつれて直線状となり、破壊近くの繰返し

回数になればS字形に変化し、そのときの弾性係数は、最初の約70%になることを明らかにしている。(図-2・3参照)

1910年頃になると、コンクリートのクリープ現象についての関心も高まり、疲労現象をも含めたコンクリートの塑性挙動に関する研究が注目されるようになった。

⁵⁶⁾ ⁵⁷⁾ ⁵⁸⁾ ⁵⁹⁾ ⁶⁰⁾
Probst一門のMehmel, Heim, Trieber, 吉田, 坂らによって行なわれた研究は、繰返し荷重下におけるコンクリートの漸進変形についての問題がその主なもので、これらの研究によって、コンクリートの疲労破壊の内部機構を説明するための基礎概念はほぼ確立されたように思われる。以下にそれらの研究の概要を簡単に述べる。

⁵⁶⁾
Mehmelは、繰返し荷重下におけるコンクリートのひずみに着目し、永久変形(Permanent deformation)と除荷後はその一部が徐々に回復する残留変形(remaining deformation)との区別を明確にしている。この弾性ひずみおよび残留ひずみは繰返し回数が増すにつれて増大し、残留ひずみと弾性ひずみの比も大きくなり、また、コンクリートの疲労限は静的強度の47~60%であるとしている。さらに、疲労限以下の荷重履歴を受けたコンクリートは、金属材料のひずみ硬化に類似した現象が起これ、その静的強度は高くなると述べている。

⁵⁷⁾
Heimは、材令66~94日の角柱供試体を用いて疲労試験を行ない、繰返し回数がある回数を越えると、残留ひずみが弾性ひずみよりも大きくなり、100万回を越えても一定値にならないと述べている。

⁵⁸⁾
Trieberは、材令10週、静的強度284 kg/cm²のコンクリートを用いて疲労試験を行ない、繰返し回数が1148000回になったとき残留ひずみと弾性ひずみが等しくなり、一方材令2年7ヶ月の供試体では、残留ひずみならびに弾性ひずみの繰返し回数による変化はほとんどないと報告している。

⁵⁹⁾
吉田は、繰返し荷重下におけるポアソン数の変化について検討し、繰返し回数が14万回で7~8、破壊近くの繰返し回数では、11~12になると述べている。

⁶⁰⁾
坂は、静的強度108 kg/cm²のコンクリートの疲労試験を行ない、その上限応力を30, 50, 70 kg/cm²の3段階に分けて順次増加させた際の弾性ひずみならびに残留ひずみを観察して、コンクリートの疲労破壊は弾性ひずみが静的試験の破壊時のひずみの値に達したときに起こることを明らかにしている。また、応力ひずみ曲線のヒステリシス曲線によって囲まれる面積は、上限応力が小さい場合にはほぼ一定であるが、上限応力が大きい場合には、繰返し回数とともに大きくなると述べている。

⁵³⁾
GrafとBrennerは静的強度203~322 kg/cm²のコンクリート供試体を用いて、200

万回疲労強度に対する配合，養生方法，載荷速度，応力振幅および材令の影響についての実験を行っている。この研究において注目すべき点は，上限および下限応力と疲労強度とを関係づけることによってコンクリートの疲労における応力振幅の影響を示す Modified Goodman Diagram を作成していることである。（図-2・4 参照）

1950年頃になり，人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートが実際の構造物に利用される機会が多くなり，この種コンクリートのクリープや疲労に関する研究も開始されるようになった。^{61), 62)}

Gray, Antrim, McLaughlin は，AE コンクリートおよび軽量コンクリートの疲労試験を行ない，普通コンクリートのそれと比較している。それによれば，いずれのコンクリートにおいても疲労強度には大差なく，繰返し回数 1000 万回における疲労強度は約 55% であると述べている。

一方，コンクリートの疲労寿命のばらつきを考慮して，これに統計的な手法を適用して解析することを試みたものとしては，McCall⁶³⁾の研究が挙げられる。McCall は，応力比（ S ），疲労寿命（ N ）および破壊の確率（ P ）の三者の関係を示す数学モデルを提案し，その数式の各定数は実験結果から図式的に求められるとしている。浜田と成岡⁶⁴⁾は，この考えを軽量コンクリートの疲労試験に適用して，その 200 万回疲労強度は約 57% であると報告している。

以上，従来行なわれたプレーンコンクリートの圧縮疲労試験に関する主な研究の概要について述べたが，いずれの場合にもコンクリートには明確な疲労限はみとめられないようである。したがって，コンクリートの疲労を論じる場合には，疲労限を特性値に採らず， $S-N$ 線図におけるある繰返し回数に対する応力比（ S ）をもって，疲労強度（時間強度）とすべきである。このように定義された繰返し回数には，一般に 200 万回が採られているようである。

<第2章 参考文献>

- 1) E.M.Wallo and C.E.Kesler "Prediction of Creep in Structural Concrete" University of Illinois, December, 1966年
- 2) G.Pickette, "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and a Hypothesis Concerning Shrinkage" Journal of the ACI, vol.52, 1956
- 3) A.M.Neville, "Creep of Concrete as a Function of Cement Paste" Magazine of Concrete Research, Vol.16, No.46, March, 1964
- 4) R.E.Davis and H.E.Davis, "Flow of Concrete under Sustained Compressive Stress" Proc. of ASTM, Vol.30, Part II, 1930
- 5) R.E.Davis, "A Summary of Investigations of Volume Changes in Cements, Mortars and Concretes Produced by Causes other than Stress" Journal of the ACI, Vol.27, Part 2, 1931
- 6) R.E.Davis and G.E.Troxell, "Properties of Concrete and Their Influence on Prestress Design" Journal of the ACI, Vol.50, 1954
- 7) J.J.Shideler, "Lightweight Aggregate Concrete for Structural Use" Journal of the ACI, Vol.54, 1957
- 8) 西林新蔵, "人工軽量骨材コンクリートの乾燥収縮およびクリープ" 材料, Vol.15, No.157, 1966年10月
- 9) K.M.Alexander and J.Wardler, "Effect of Powdered Minerals and Fine Aggregate on Drying Shrinkage of Portland Cement Pastes" Journal of the ACI, Vol.55, 1959
- 10) J.Glucklich and O.Ishai, "Rheological Behavior of Hardend Cement Paste under Low Stresses" Journal of the ACI, Vol.57, 1961
- 11) G.E.Troxell, J.M.Raphael and R.E.Davis, "Long Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete" Proc. of ASTM, Vol.58, 1958

- 12) 藤松進他, "セメントの種類がコンクリートの収縮きれつにおよぼす影響に関する研究" 日本建築学会論文集, 第69号, 昭和36年10月
- 13) R.E.Davis and G.E.Troxell, "Volumetric Changes in Portland Cement Mortars and Concrete" Journal of the ACI, Vol.25, 1928
- 14) R.E.Davis, "Report of Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates" Appendix XII, Proc. of ASTM, Vol.30, Part I, 1930
- 15) 岡田清, "AEコンクリートのクリープ" セメント技術年報, 昭和28年
- 16) B.B.Hope and D.G.Manning, "Creep of Concrete Influenced by Accelerators" Journal of the ACI, May, 1971
- 17) 岡田, 小林, 岡村, "遠心力締固め効果に対する要因実験" セメントコンクリート, №261, 1968
- 18) J.M.Illston, "The Components of Strain in Concrete under Sustained Compressive Stress" Magazine of Concrete Research Vol.17, №50, March, 1965
- 19) 西林, 浅海, 阪田, "人工軽量骨材コンクリートのクリープに関する研究" セメント技術年報, 昭和42年
- 20) E.C.Higginson, "Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete" Journal of the ACI, Vol.58, 1961
- 21) J.Glucklich and O.Ishai, "Creep Mechanism in Cement Mortar" Journal of the ACI, Vol.59, 1962
- 22) 仕入豊和, "コンクリートの引張クリープ" 日本建築学会大会学術講演要旨集, 昭和39年9月
- 23) O.Ishai, "Elastic and Inelastic Behavior of Hardened Mortar in Torsion" Symposium on Creep of Concrete, Publication SP-9 ACI, Paper №3, 1964
- 24) 渡辺明他, "コンクリートのねじりクリープに関する実験" 土木学会第23回年次学術講演会講演概要, 昭和43年10月
- 25) A.D.Ross, "Experiments on the Creep of Concrete under Two Dimensional Stressing" Magazine of Concrete Research, Vol.6, №16, 1954

- 26) 神山一, "二方向にプレストレスを与えたコンクリートのクリープ" セメント技術年報, 昭和42年
- 27) O. Ishai, "Influence of Sand Concentration on Deformation of Mortar Beams under Low Stress" Journal of the ACI, Vol. 58, 1961
- 28) D. J. Hannant, "Creep and Creep Recovery of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stress" Journal of the ACI, Vol. 66, No. 5, May, 1969
- 29) T. C. Hansen, "Effect of Wind on Creep and Drying Shrinkage of Hardened Cement Mortar and Concrete" Materials Research and Standards, ASTM, Vol. 6, No. 1, January, 1966
- 30) G. L. England and A. D. Ross, "Reinforced Concrete under Thermal Gradients" Magazine of Concrete Research, Vol. 14, No. 40 March, 1962
- 31) K. W. Nasser and A. M. Neville, "Creep of Concrete at Elevated Temperatures" Journal of the ACI, Vol. 62, 1965
- 32) 岡田, 小柳, 阪田, "クリープの環境湿度依存性について" 土木学会コンクリートライブラリー第24号, 1969年4月
- 33) T. C. Hansen and A. H. Mattock, "Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete" Journal of the ACI, Vol. 63, 1966
- 34) 岡田清, "コンクリートのクリープ" コンクリートパンフレット第29号, 日本セメント技術協会
- 35) D. W. Hobbs and A. R. Mears, "The influence of specimen geometry upon weight change and Shrinkage of air-dried mortar specimen" Magazine of Concrete Research, Vol. 23, No. 75~76, June-September, 1971
- 36) A. M. Neville, "Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed" North-Holland Publishing Company, 1970
- 37) G. Pickett, "Shrinkage Stress in Concrete" Journal of the ACI, Vol. 17, No. 3, January, 1946

- 38) 岡田, 川村, “ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二三の考察” 土木学会論文集, 第142号, 昭和42年6月
- 39) 吉田弥七, “乾燥によるコンクリートの亀裂に関する主要性質の実験的研究(其の一)” 土木学会論文集, 第2号, 昭和19年6月
- 40) N.K.Becker and C.Macinnis, “A Theoretical Method for Predicting the Shrinkage of Concrete” Journal of the ACI, September, 1973
- 41) K.S.Gopalakrishnan, A.M.Neville and A.Ghali, “A Hypothesis on Mechanism of Creep of Concrete with reference to Multiaxial Compression” Journal of the ACI, January, 1970
- 42) Z.P.Bažant, “Thermodynamics of interacting Continua with surfaces and creep analysis of concrete structure” Nuclear Engineering and Design, Vol.20, No.2, 1972
- 43) 久保慶三郎, “セメントモルタルの塑性とクリープ” 土木学会論文集, 第13号, 1952年3月
- 44) 堀素夫, “セメントおよびコンクリートの破壊現象の確率論的研究” 学位論文, 昭和36年2月
- 45) 桜井春輔, “セメントモルタルのクリープ変形と破壊に関する実験的研究” 土木学会論文報告集, No.217, 1973年9月
- 46) 石川達夫他, “高応力下でのコンクリートのクリープ性状” 土木学会第27回年次学術講演会概要集, 昭和47年10月
- 47) 徳光善治他, “コンクリート(モルタル)の時間依存の強度特性” 土木学会第28回年次学術講演会概要集, 昭和48年10月
- 48) 小柳, 阪田, 柴田, “モルタル, コンクリートのクリープ破壊に関する2, 3の実験” 材料学会年次講演会概要集, 昭和43年5月
- 49) 近藤, 坂監修, “コンクリート工学ハンドブック” 朝倉書店
- 50) 栗原則夫, “粘土のクリープ破壊に関する実験的研究” 土木学会論文報告集, 第202号 1972年6月
- 51) J.W.Murdock, “A Critical Review of Research on Fatigue of Plain Concrete” T&A.M.Report, No.638, August, 1963, University of Illinois

- 52) J.A.Neal and C.E.Kesler, "Some Aspects of Fatigue of Concrete" T&A.M.Report, № 657, July, 1965, University of Illinois
- 53) G.M.Nordby, "Fatigue of Concrete—A Review of Research" Journal of the ACI, August, 1958
- 54) K.D.Raithby and A.C.Whiffin, "Failure of Plain Concrete under Fatigue Loading—A Review of Current Knowledge" PRL Report LR 231, Crowthorne, Berkshire, 1968
- 55) Van Ornum, "Fatigue of Cement Products" Transactions, ASCE, Vol. 51, 1903
- 56) A.Mehmel, "Untersuchungen über den Einfluss häufig wiederholter Druckbeanspruchungen auf Druckelastizität und Druckfestigkeit von Beton" Mitteilungen des Instituts für Beton und Eisenbeton an der Technischen Hochschule Karlsruhe, 1926
- 57) K.E.Heim, "Einfluss häufig wiederholter Belastungen auf die Rissbildung und Rissicherheit von Eisenbetonbalken" Mitteilungen des Instituts für Beton und Eisenbeton an der Technischen Hochschule Karlsruhe, 1930
- 58) F.Treiber, "Das Verhalten unter dem Einfluss dauernd ruhender und häufig wiederholter Belastung" Bauingenieur (Berlin), 1934
- 59) H.Yoshida, "Über das Elastische Verhalten von Beton" Mitteilungen des Instituts für Beton und Eisenbeton an der Technischen Hochschule Karlsruhe, 1930
- 60) S.Ban, "Der Ermüdungsvorgang von Beton" Bauingenieur (Berlin), 1934
- 61) J.C.Antrim and J.F.McLaughlin, "Fatigue Study of Air-Entrained Concrete" Journal of the ACI, Vol. 30, № 11, 1959
- 62) W.H.Grey, J.F.McLaughlin and J.D.Antrim, "Fatigue Properties of Lightweight Concrete" Journal of the ACI, August,

1961

- 63) J.T.McCall, "Probability of Fatigue Failure of Plain Concrete" Journal of the ACI, August, 1958
- 64) 浜田, 成岡, "軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験" 土木学会論文報告集, 第176号, 1970年4月

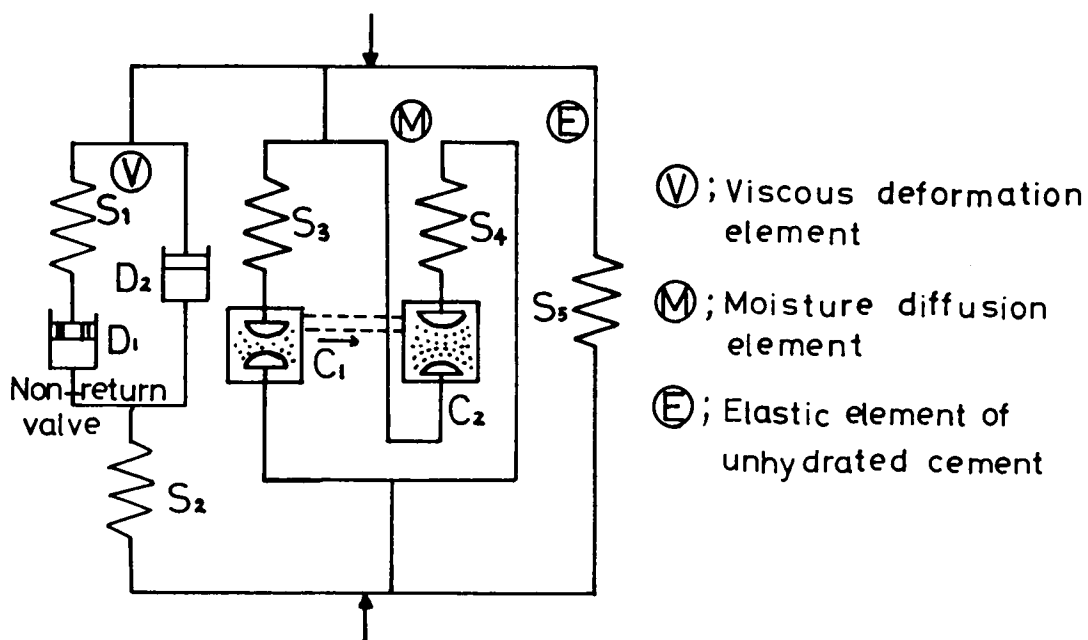


図-2・1 コンクリートのクリープのレオロジカルモデル

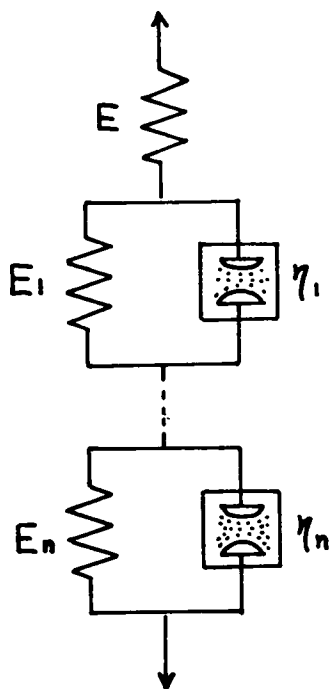
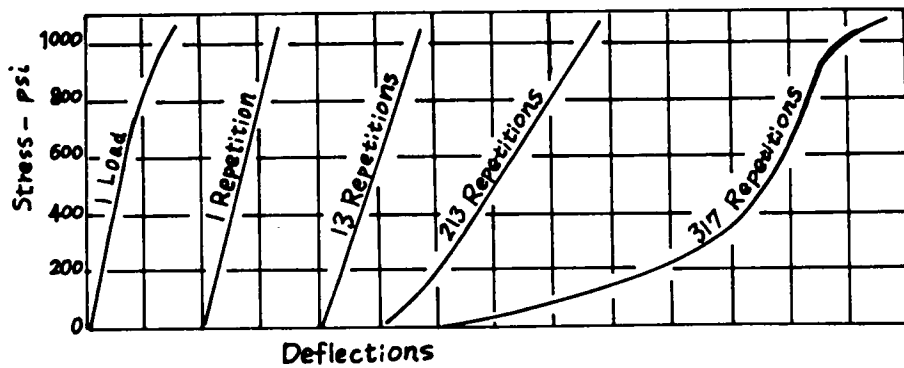
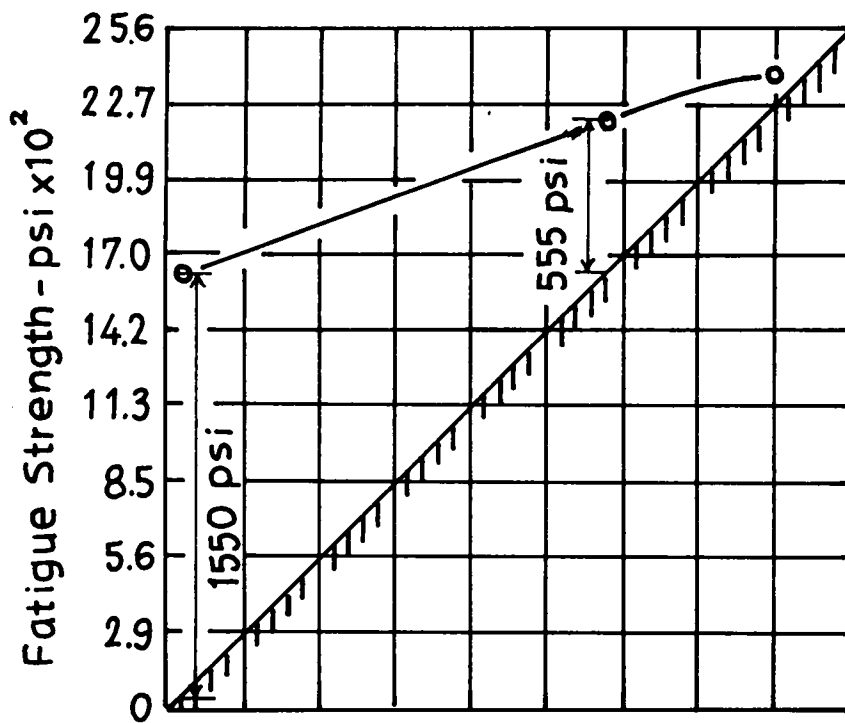


図-2・2 セメントペースト中の妨げられた吸着層と弾性粒子の相互作用を表わすモデル



☒-2.3 Stress-Strain Diagrams (Van Ornum)



☒-2.4 Modified Goodman Diagram

第3章 コンクリートの乾燥収縮の生成機構に関する研究

3.1 概説と研究目的

コンクリートの乾燥収縮は、クリープと同様にコンクリートが有する重要な性質の一つであり、第2章でも述べたように、従来より内外の多くの研究者によって種々の面より検討されている。とくに、PC構造物の設計においては、乾燥収縮やクリープによるプレストレスの減退が問題になる。さらに、最近の構造物の長大化、巨大化に伴ない、構造物の軽量化が要請される結果、軽量コンクリートと普通コンクリートおよび鋼との合成断面を有する構造物が登場し、この種の構造物においては打ち継ぎ部に発生する収縮差応力が、設計上重要な問題になっている。また収縮によるひびわれは、鉄筋の錆化をもたらし、鉄筋コンクリートの海洋構造物への適用においては看過できない問題の一つである。

コンクリート標準示方書においては、不静的構造物の設計の際に乾燥収縮を考慮する程度で、それほど重要な問題として取扱われていないようであるが、コンクリートにとって重大な欠点の一つであるひびわれの原因としての乾燥収縮の問題は、十分に検討されるべきものであると考える。そのためには、種々の条件下における乾燥収縮のデータの蓄積ばかりでなく、コンクリートの乾燥収縮を、その生成機構の面からも検討することが、きわめて重要な問題であると思われる。

従来の研究によれば、コンクリートの乾燥収縮の生成機構は、供試体と環境との湿度勾配に起因するシーページ効果によって定性的に説明されているものが多く¹⁾、それを定量的に明らかにしたものはきわめて少ない。また、コンクリートの乾燥収縮が、巨視的にはコンクリート中の水分の逸散に起因するものであるとしても、Pickett²⁾や吉田³⁾のいうように、逸散水量と乾燥収縮ひずみが時間の経過によらず一定であるということについても検討を要する問題であると思われる。すなわちコンクリート中に存在する水分の形態は必ずしも様なものではなく、したがってその逸散の様相も時間とともに変化することが予想される。いずれにしろ、コンクリートの乾燥収縮の生成機構を論じる場合には、コンクリート中に種々の形で存在する水分の時間的な挙動と乾燥収縮の時間的な変化とを定量的に検討することが必要であると思われる。

本研究は、以上述べたように、コンクリートの乾燥収縮を論じる場合の重要な要因の一つであるコンクリート中の水分の乾燥に伴う挙動に着目し、吸水量の異なる3種類の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと乾燥に伴う逸散水量とを測定し、乾燥収縮におよぼす環境の湿度条件の影響、コンクリート中の水分の逸散機構および乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係について論じたものである。また、それらの結果をもとにして、コンクリートの乾燥収縮の生成機構について若干の考察を行なう。

3.2 実験計画および実験方法

(1) 使用材料と供試体

本実験に使用した骨材は、天然骨材（碎石および川砂）、造粒型人工軽量骨材ライオナイト（大阪社製）および非造粒型人工軽量骨材宇部軽骨（宇部社製）の3種類で、その物理的性質を表-3・1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント（大阪社製）を用いた。その物理的試験結果を表-3・2に示す。コンクリートの配合を表-3・3に示す。本実験においては目標強度は考慮せず、セメント、水、細骨材および粗骨材の容積率が、コンクリートの種類にかかわらず一定となるように、配合を決定した。

乾燥収縮ひずみおよび逸散水量測定用の供試体は、すべて $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試体である。（図-3・1参照）

コンクリートの練混ぜは、4切可傾式ミキサを用いて行ない、練混ぜ時間は全材料投入後3分間とした。コンクリートの締固めは棒突き法によった。供試体は、打設後24時間実験室中（室温）に放置した後脱型し、脱型後は材令27日目まで標準水中養生を施した。

(2) 実験条件と実験方法

表-3・4に実験条件を示す。なお表-3・4中、Sは供試体の表面をビニール塗料で被覆したものを、USは被覆しないものを意味し、水中に保存した供試体はUSのみとした。

水中養生を施した供試体は、材令27日目に水中よりとり出し、約15時間温度20℃、湿度80%の恒湿恒温室内に置き、供試体表面が乾燥した直後にひずみ測定用のゲージブラグを相対する2面にそれぞれ2組ずつ、合計4組貼付けた。また同時に、S供試体をビニール塗料で被覆した。

乾燥収縮ひずみおよび逸散水量の測定は、材令28日目より開始し、約100日間測定を継続した。ひずみの測定にはフォーゲンベルガー型ひずみ計（検長10インチ）を用い、逸散水量の測定には卓上台秤（秤量：10 kg、感量：1 g）を用いた。なお、水中に保存した供試体については、水分の逸散がないものと仮定して、逸散水量の測定は行なわなかった。

3.3 コンクリートの乾燥収縮の環境湿度依存性

乾燥収縮ひずみおよび逸散水量の測定結果を表-3・5に示す。表-3・5に示した乾燥収縮ひずみおよび逸散水量は、いずれも、実験開始後100日目の測定値（ S_{100} 、 W_{100} ）である。図-3・2～3・4に、乾燥収縮ひずみと時間との関係を示す。

従来の研究^{4)～6)}によれば、軽量コンクリートの乾燥収縮は、普通コンクリートのそれと同程度か、あるいは若干大きくなるものが多い。しかしながら、本実験の結果によれば、ライ

オナイトを用いたコンクリート（以下ライオナイトコンクリートまたはLCと略称）の乾燥収縮は、普通コンクリートのそれと大差はないが、吸水量の多い宇部軽骨を用いたコンクリート（以下宇部軽骨コンクリートまたはUCと略称）の乾燥収縮は、普通コンクリートのそれに比較してかなり小さい。これは、骨材の吸水量の多い宇部軽骨コンクリートでは他のコンクリートよりも骨材中の遊離水の逸散が多く、したがってセメントペースト中の水分の逸散が少ないために収縮が小さくなったためであると想像される。表-3・1によれば、天然骨材とライオナイトの吸水量は大差はないが、宇部軽骨の吸水量は前二者に比較してかなり大きい、そのことから本実験の結果がうかがわれる。

一方、表-3・5によれば、表面を被覆した供試体の乾燥収縮は、被覆しない供試体の乾燥収縮よりも小さい。これは、表面を被覆することによって、供試体中の水分が外部へ逸散するのが妨げられるため、その乾燥収縮が小さくなったことによるものと考えられる。また、環境の湿度が高いほどその乾燥収縮は小さくなる。これは、環境の湿度が高くなれば、供試体中の水分の逸散は緩慢となり、その結果、乾燥収縮が小さくなるためである。

図-3・5に、実験開始後100日目における乾燥収縮ひずみ（ S_{100} ）と環境の湿度との関係を示す。これによれば、コンクリートの種類にかかわらず、環境の湿度が高いほどその乾燥収縮は小さく、さらに表面を被覆して水分の逸散を少なくしたものほど乾燥収縮が小さくなることわかる。このような結果は著者らが以前に行なった別の実験⁷⁾においても認められたことである。

図-3・6は、著者が行なった別の実験の結果⁸⁾を示したものである。すなわち、材令100日目まで湿度100%の環境に放置された供試体を、100日目に湿度50%の環境に移した後の乾燥収縮と時間との関係（点線で示す）と、最初から湿度50%の環境に置かれた同一のコンクリートの乾燥収縮と時間との関係（実線で示す）とを比較したものである。図-3・6によれば、普通コンクリートおよび軽量コンクリートいずれの場合も、曲線の形状および乾燥収縮ひずみの値は、ほとんど一致している。すなわち、コンクリートは、水分の逸散がなければ収縮しないものであるということが想像される。このことから、コンクリートの乾燥収縮が水分の逸散と密接な関係にあることがうかがわれる。

以上述べたように、コンクリート乾燥収縮は、供試体中の水分の外部への逸散に起因するところが大きく、供試体中の水分の多寡、環境の湿度条件および供試体表面の状態などの要因の影響が支配的である。

従来より乾燥収縮の生成機構は、環境と供試体との湿度勾配に起因するシーページ効果によって説明されているが、それは上述のような実験的事実によるものである。しかしながら、コンク

リートの乾燥収縮の生成機構をより詳しく考察するためには、乾燥収縮の原因と考えられるコンクリート中の水分の挙動について検討すべきであると考え。以下に本研究において行なった乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散に関する実験の結果について述べる。

3.4 コンクリート中の水分の逸散機構についての考察

図-3・7および3・8に、それぞれ、表面を被覆しない供試体と、被覆した供試体の逸散水量と時間との関係を示す。図-3・7によれば、供試体中の水分が多くなるにしたがって、さらに環境の湿度が低いほど、その逸散水量は多くなる。また、環境の湿度が低い場合には、初期において水分逸散の割合が大きく、時間の経過とともにその割合は小さくなっているが、環境の湿度が高い場合には、100日程度の測定ではまだまだ直線的に水分が逸散しており、測定を継続すれば、さらに多くの水分が逸散するものと考えられる。このことから、水分の逸散の速度は供試体の有している水量と密接な関係があることが推察される。このような傾向は、図-3・8に示した、供試体表面を被覆したものの実験結果からもうかがわれる。すなわち、コンクリート中の水分の多い字部軽骨コンクリートでは、環境の湿度が50%の場合ですら、その水分の逸散は直線的であるが、普通コンクリートやライオナイトコンクリートでは、徐々にではあるが、その逸散速度は小さくなっている。

図-3・9～3・12は、逸散水量と単位時間(日)当りの逸散水量(逸散速度)との関係を示したものである。

図-3・9は、表面を被覆しない供試体の、環境湿度50%の場合について示したものであるが、コンクリートの種類にかかわらず、逸散速度との関係は一つの折線で表わされ、逸散水量がある値を越えると逸散速度の低下の割合が変化する。このような傾向は図-3・11に示した表面を被覆した供試体についてもみとめられるが、逸散速度の変化はゆるやかである。また、図-3・10に表面を被覆しない供試体の環境湿度80%の場合の結果を示したが、この場合にも図-3・9と同様の関係がみとめられる。しかし、逸散速度は湿度が50%の場合よりも小さく、逸散速度の変化もほぼ直線的と考えられる。さらに、図-3・12によれば、環境の湿度が高く、供試体の表面が被覆された場合には、逸散速度はもっとも小さく、またその変化もゆるやかで、直線的に低下している。

以上の結果を総合すると、コンクリートが乾燥されるとき、環境の湿度が十分に低ければ、コンクリート中の水分の外部への逸散機構は一様なものではなく、乾燥の初期と後期においてその機構に何らかの相違があると思われる。

前に示した図-3・9において直線の折れる点の水量は、普通コンクリート、ライオナイトコ

ンクリートおよび宇部軽量コンクリートで、それぞれ、140g、170g、410gであり、骨材中の水分が多いほど大きくなっている。すなわち、この点を境にして水分逸散機構が相違するものと考えられる。またコンクリートの種類によって水分逸散機構が変化する点の水量が異なるのは骨材中の水分の外部への逸散量の相違によるものであると思われる。

表-3・5および図-3・10によれば、表面を被覆しない供試体の環境湿度80%の場合の100日目における逸散水量は、普通コンクリート、ライオナイトコンクリートおよび宇部軽骨コンクリートで、それぞれ、94g、166gおよび405gである。これらの水量は、上述の水分逸散機構が変化すると思われる点の水量よりもいずれも少ない。従って、環境の湿度が高い場合には、まだ水分の逸散機構が変化するにはいたっていない。

図-3・11によれば、環境湿度が50%で、表面を被覆した供試体においては、水分の逸散機構が変化すると思われる点の水量は、普通コンクリート、ライオナイトコンクリートおよび宇部軽骨コンクリートで、それぞれ92g、98gおよび160gであり、上述の表面を被覆しない供試体のそれよりも小さい。これは表面を被覆した供試体の全逸散可能水量が、表面を被覆しない供試体のそれよりも少なくなるためであると思われる。なお表面を被覆した供試体の環境湿度80%の場合の100日目における逸散水量は、それぞれ、70g、98gおよび180gで、上記の水分の逸散機構が変化する点の水量よりも少ないか、または若干多いだけであり、図-3・12に示したように、逸散速度の変化も直線的である。

以上に述べたように、乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散の機構が、ある点を境にして若干相違するのは、HobbsとMears¹⁾が述べているように、乾燥の初期においては、大きな毛細管空げき中の水分の逸散やそれを補う骨材中の遊離水の逸散が支配的であり、乾燥の後期においては、ゲル空げき中の水分の逸散が支配的になるためではないかと思われる。なお、このような見解の妥当性については、後に水分の逸散と乾燥収縮ひずみの時間的な変化を比較検討することによって明らかにするつもりである。

3.5 拡散方程式によるコンクリート中の水分逸散に関する考察

前節までにおいて、コンクリートの乾燥収縮がコンクリート中の水分の外部への逸散に起因することやコンクリート中の水分の逸散の時間的な変化の状況などについて明らかにした。また、2.1において、Pickett²⁾や吉田³⁾が、それぞれ、1次元および2次元の拡散方程式を用いて、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみと内部応力の問題について検討していることを述べた。

ここでは本研究の実験条件に合わせて、3次元の拡散方程式を解き、それに逸散水量の測定結果を適用することにより、乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散の様相を理論的に検討する

ことを試みる。

(1) 拡散方程式の解法 ^{9) 10) 11)}

まず、拡散方程式を解くにあたり、つぎの仮定をおく。

- 1) 供試体中の水分の移動、すなわち、各点における含水量の変化は拡散方程式にしたがう。
- 2) 供試体表面から空気中への水分の逸散は、Newton の表面熱移動則 (輻射の法則) にしたがう。

供試体は本実験に用いたものと同様に直方体とし、座標軸を図-3・13のようにとるとき、3次元拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

ここに、 $C = C(x, y, z, t)$: 点 (x, y, z) , 時間 $t = t$ における単位体積あたりの含水量

K : 拡散係数

(3.1) 式において、求める含水量 C が

$$C = e^{-\lambda t} \cdot u(x, y, z) \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

の形で、時間 t だけの関数と場所だけの関数 u との積で表わしうるものと仮定する。

(3.2) 式を (3.1) 式に代入すると:

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

を得る。ここに、 $k^2 = \lambda / K$ である。

いま、 $u = u(x) \cdot u(y) \cdot u(z)$ とおくと、(3.3) 式より、次式が成立する。

$$\frac{u''(x)}{u(x)} + \frac{u''(y)}{u(y)} + \frac{u''(z)}{u(z)} = -k^2 \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

(3.4) 式の左辺の各項は、それぞれ、 x, y および z のみの関数であり、それらの和が $-k^2$ (定数) に等しくなるためには左辺の各項は定数でなければならない。

$$\frac{u''(x)}{u(x)} = -\alpha^2, \quad \frac{u''(y)}{u(y)} = -\beta^2, \quad \frac{u''(z)}{u(z)} = -\gamma^2 \quad \text{-----} \quad (3.5)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{すなわち, } u''(x) + \alpha^2 u(x) &= 0 \\ u''(y) + \beta^2 u(y) &= 0 \\ u''(z) + \gamma^2 u(z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (3.6)$$

(3.6) 式の解はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} u(x) &= \cos \alpha x + A \sin \alpha x \\ u(y) &= \cos \beta y + B \sin \beta y \\ u(z) &= \cos \gamma z + C \sin \gamma z \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

$$\text{ただし, } \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = k^2$$

供試体表面 ($x=0$, a ; $y=0$, b ; $z=0$, c) において, 仮定2) の境界条件を適用すると, つぎのようになる。ただし, 空気中の $C=0$ とする。

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=0} &= \mu_1 [C]_{x=0}, \quad \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=a} = -\mu_2 [C]_{x=a} \\ \left[\frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=0} &= \mu_3 [C]_{y=0}, \quad \left[\frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=b} = -\mu_4 [C]_{y=b} \\ \left[\frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=0} &= \mu_5 [C]_{z=0}, \quad \left[\frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=c} = -\mu_6 [C]_{z=c} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

(3.8) 式の C を (3.3) および (3.7) 式を用いて u に変換すると, つぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial u(x)}{\partial x} \right]_{x=0} &= \mu_1 [u(x)]_{x=0}, \quad \left[\frac{\partial u(x)}{\partial x} \right]_{x=a} = -\mu_2 [u(x)]_{x=a} \\ \left[\frac{\partial u(y)}{\partial y} \right]_{y=0} &= \mu_3 [u(y)]_{y=0}, \quad \left[\frac{\partial u(y)}{\partial y} \right]_{y=b} = -\mu_4 [u(y)]_{y=b} \\ \left[\frac{\partial u(z)}{\partial z} \right]_{z=0} &= \mu_5 [u(z)]_{z=0}, \quad \left[\frac{\partial u(z)}{\partial z} \right]_{z=c} = -\mu_6 [u(z)]_{z=c} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

ここに, μ は表面係数 f (cm/day) と拡散係数 K (cm^2/day) とによって決定される係数で, 蒸発係数 ($1/\text{cm}$) と定義する。

$$\mu = f/K \quad (3.10)$$

なお表面係数 f ¹²⁾ は熱移動に関するニュートンの方程式における熱伝達係数¹³⁾あるいは surface coefficient of heat transfer¹⁴⁾といわれるものに相当する。すなわち, ここではコンクリートの性質, コンクリートの表面の状態および環境条件などによって定まる実験定数である。また μ はコンクリートの表面からの水分の蒸発のしやすさを表わす係数であるので蒸発係数とよぶことにする。

境界条件 (3・9) 式を用いて, (3・7) 式の積分定数 A, B, C を決定する。

$x=0$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial u(x)}{\partial x} \right]_{x=0} &= A\alpha, \quad \mu_1 [u(x)]_{x=0} = \mu_1 \\ \therefore A &= \mu_1 / \alpha \end{aligned} \right\} \text{----- (3・11)}$$

$$\text{従って,} \quad u(x) = \cos \alpha x + \frac{\mu_1}{\alpha} \sin \alpha x \text{----- (3・12)}$$

となる。

$x=a$ のとき,

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial u(x)}{\partial x} \right]_{x=a} &= \alpha \sin \alpha a + \mu_1 \cos \alpha a \\ -\mu_2 [u(x)]_{x=a} &= -\mu_2 \cos \alpha a - \frac{\mu_1 \mu_2}{\alpha} \sin \alpha a \end{aligned}$$

よって,

$$\sin \alpha a = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\alpha^2 - \mu_1 \mu_2} \alpha \cos \alpha a \text{----- (3・13)}$$

(3・13) 式を, $X = \alpha a$ として, つぎのように書き換える。

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \cot X \\ f(x) &= \frac{X}{(\mu_1 + \mu_2)a} \left(1 - \frac{\mu_1 \mu_2 a^2}{X^2} \right) \end{aligned} \right\} \text{----- (3・14)}$$

いま, x に関する固有値を α_n とすれば, α_n は (3・14) 式の 2 曲線の交点として求められる n 番目の正根 X_n より, つぎのように与えられる。

$$\alpha_n = \frac{X_n}{a} \text{----- (3・15)}$$

つぎに, (3・12) 式の異なる固有値 $\alpha_n \neq \alpha_m$ に属する固有関数を, それぞれ, $u_n(x)$ $u_m(x)$ とすると, (3・6) 式より,

$$\left. \begin{aligned} u_n''(x) + \alpha_n^2 u_n(x) &= 0 \\ u_m''(x) + \alpha_m^2 u_m(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{----- (3・16)}$$

が成立する。

(3・16)式の上式に u_m を, 下式に $-u_n$ をかけて, $(0, a)$ 区間で積分すると, 次式が得られる。

$$\int_0^a (u_n u_m' - u_n'' u_m) dx = (\alpha_n^2 - \alpha_m^2) \int_0^a u_n \cdot u_m dx \quad \text{---(3・17)}$$

(3・17)式の左辺は, 部分積分法によって,

$$\int_0^a (u_n u_m' - u_n'' u_m) dx = \left[u_n u_m' - u_n' u_m \right]_0^a \quad \text{----- (3・18)}$$

となる。

境界条件(3・8)式によって,

$$\left[u_n u_m' - u_n' u_m \right]_0^a = 0 \quad \text{----- (3・19)}$$

となり, これを(3・18)式に代入すると,

$$\int_0^a (u_n u_m'' + u_n'' u_m) dx = 0 \quad \text{----- (3・20)}$$

となる。従って, (3・17)式において, $\alpha_n \neq \alpha_m$ であれば,

$$\int_0^a u_n u_m dx = 0 \quad \text{----- (3・21)}$$

が成立する。すなわち, u_n, u_m の直交条件を満足する。

つぎに, $\alpha_n = \alpha_m$ のときは, (3・17)および(3・18)式より,

$$\begin{aligned} \int_0^a u_n^2 dx &= \lim_{\alpha_m \rightarrow \alpha_n} \frac{1}{\alpha_n^2 - \alpha_m^2} \left[u_n u_m' - u_n' u_m \right]_0^a \\ &= \frac{1}{2\alpha_n} u_n(a) \frac{\cos \alpha_n a}{\alpha_n (\alpha_n^2 - \mu_1 \mu_2)} \{ (\alpha_n^2 + \mu_1 \mu_2)(\mu_1 + \mu_2) + a(\alpha_n^2 + \mu_1^2)(\alpha_n^2 + \mu_2^2) \} \\ &\quad \text{----- (3・22)} \end{aligned}$$

が得られる。 $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_0 = \mu$ とすることができるから, (3・22)式は,

$$\begin{aligned} \int_0^a u_n^2 dx &= \frac{1}{2\alpha_n} u_n(a) \frac{\cos \alpha_n a}{\alpha_n (\alpha_n^2 - \mu^2)} \{ (\alpha_n^2 + \mu^2) \cdot 2\mu + a(\alpha_n^2 + \mu^2)^2 \} \\ &= \frac{(\alpha_n^2 + \mu^2)^2 \{ (\alpha_n^2 + \mu^2) a + 2\mu \}}{2\alpha_n^2 (\alpha_n^2 - \mu^2)^2} \cos^2 \alpha_n a \quad \text{----- (3・23)} \end{aligned}$$

となる。

従って、基準化（正規直交化）された固有関数は次式のようになる。

$$u_n(x) = \left[\frac{2(\alpha_n^2 + \mu^2)^2}{(\alpha_n^2 + \mu^2)^2 \{ (\alpha_n^2 + \mu^2)a + 2\mu \} \cos^2 \alpha_n a} \right]^{\frac{1}{2}} (\alpha_n \cos \alpha_n x + \mu \sin \alpha_n x) \quad (3 \cdot 24)$$

y, z に関する固有関数 $u_m(y), u_l(z)$ についても同様である。

以上のことから、 C の求める解は一般に次式のようにおくことができる。

$$C = \sum_{n,m,l} I_{n,m,l} u_n(x) \cdot u_m(y) \cdot u_l(z) \cdot e^{-\lambda t} \quad (3 \cdot 25)$$

この C が、 $t=0$ のとき、区間 $(0, a), (0, b), (0, c)$ で C_0 （実験開始時の含水量）になるためには、 $(3 \cdot 25)$ 式の係数 $I_{n,m,l}$ は、この区間における C_0 のフーリエ正弦級数でなければならない。

$(3 \cdot 24)$ 式の両辺に u をかけて積分し、 $t=0$ とおくと、

$$I_{n,m,l} = \frac{\int_V C_0 u \, dV}{\sum_{n,m,l} e^{-\lambda t} \int_V u^2 \, dV} = \int_V C_0 u(x', y', z') \, dV' \quad (3 \cdot 26)$$

となる。

ここにおいて、 $u(x', y', z') = u_{t=0}$

$$C_0 = C(x, y, z, 0)$$

$(3 \cdot 26)$ 式を $(3 \cdot 25)$ 式に代入すると次式が得られる。

$$C = \sum_{n,m,l} \left[\int_0^a \int_0^b \int_0^c C_0 u_n(x') u_m(y') u_l(z') \, dx' \, dy' \, dz' \right] \cdot u_n(x) \cdot u_m(y) \cdot u_l(z) \cdot e^{-Kkt} \quad (3 \cdot 27)$$

$(3 \cdot 24)$ 式ならびに同様にして求められる $u_m(y), u_l(z)$ を式 $(3 \cdot 27)$ 式に代入して、整理すると、

$$\begin{aligned}
C = C_0 \sum_{n,m,\ell} & \frac{2(\alpha_n^2 - \mu^2)\mu}{\alpha_n^2(\alpha_n^2 + \mu^2)\{(\alpha_n^2 + \mu^2)a + 2\mu\} \cos^2 \alpha_n a} \left\{ \cos \alpha_n a + \frac{\alpha_n^2 - \mu^2}{\alpha_n^2 + \mu^2} \right\} \\
& \cdot \frac{2(\beta_m^2 - \mu^2)\mu}{\beta_m^2(\beta_m^2 + \mu^2)\{(\beta_m^2 + \mu^2)b + 2\mu\} \cos^2 \beta_m b} \left\{ \cos \beta_m b + \frac{\beta_m^2 - \mu^2}{\beta_m^2 + \mu^2} \right\} \\
& \cdot \frac{2(\gamma_\ell^2 - \mu^2)\mu}{\gamma_\ell^2(\gamma_\ell^2 + \mu^2)\{(\gamma_\ell^2 + \mu^2)c + 2\mu\} \cos^2 \gamma_\ell c} \left\{ \cos \gamma_\ell c + \frac{\gamma_\ell^2 - \mu^2}{\gamma_\ell^2 + \mu^2} \right\} \\
& \cdot \left\{ \alpha_n \cos \alpha_n x + \mu \sin \alpha_n x \right\} \cdot \left\{ \beta_m \cos \beta_m y + \mu \sin \beta_m y \right\} \\
& \cdot \left\{ \gamma_\ell \cos \gamma_\ell z + \mu \sin \gamma_\ell z \right\} \cdot e^{-Kk^2 t} \quad \text{----- (3.28)}
\end{aligned}$$

となる。従って、供試体各点における（時間 t における含水量）／（全逸散可能水量），すなわち， C_{part} は，

$$\begin{aligned}
C_{part} = C/C_0 = \sum_{n,m,\ell} & \frac{2(\alpha_n^2 - \mu^2)\mu}{\alpha_n^2(\alpha_n^2 + \mu^2)\{(\alpha_n^2 + \mu^2)a + 2\mu\} \cos^2 \alpha_n a} \left\{ \cos \alpha_n a + \frac{\alpha_n^2 - \mu^2}{\alpha_n^2 + \mu^2} \right\} \\
& \cdot \frac{2(\beta_m^2 - \mu^2)\mu}{\beta_m^2(\beta_m^2 + \mu^2)\{(\beta_m^2 + \mu^2)b + 2\mu\} \cos^2 \beta_m b} \left\{ \cos \beta_m b + \frac{\beta_m^2 - \mu^2}{\beta_m^2 + \mu^2} \right\} \\
& \cdot \frac{2(\gamma_\ell^2 - \mu^2)\mu}{\gamma_\ell^2(\gamma_\ell^2 + \mu^2)\{(\gamma_\ell^2 + \mu^2)c + 2\mu\} \cos^2 \gamma_\ell c} \left\{ \cos \gamma_\ell c + \frac{\gamma_\ell^2 - \mu^2}{\gamma_\ell^2 + \mu^2} \right\} \\
& \cdot \left\{ \alpha_n \cos \alpha_n x + \mu \sin \alpha_n x \right\} \cdot \left\{ \beta_m \cos \beta_m y + \mu \sin \beta_m y \right\} \\
& \cdot \left\{ \gamma_\ell \cos \gamma_\ell z + \mu \sin \gamma_\ell z \right\} \cdot e^{-Kk^2 t} \quad \text{----- (3.29)}
\end{aligned}$$

となり，さらに供試体全体における（時間 t における含水量）／（全逸散可能水量）， $Call$ は，

$$Call = \int_V C_{part} dV$$

$$\begin{aligned}
= \sum_{n,m,\ell} & \frac{2\mu^2}{\alpha_n^2 \{(\alpha_n^2 + \mu^2)a + \mu\} \cos^2 \alpha_n a} \left\{ \cos \alpha_n a + \frac{\alpha_n^2 - \mu^2}{\alpha_n^2 + \mu^2} \right\} \\
& \frac{2\mu^2}{\beta_m^2 \{(\beta_m^2 + \mu^2)b + \mu\} \cos^2 \beta_m b} \left\{ \cos \beta_m b + \frac{\beta_m^2 - \mu^2}{\beta_m^2 + \mu^2} \right\} \\
& \frac{2\mu^2}{\gamma_\ell^2 \{(\gamma_\ell^2 + \mu^2)c + \mu\} \cos^2 \gamma_\ell c} \left\{ \cos \gamma_\ell c + \frac{\gamma_\ell^2 - \mu^2}{\gamma_\ell^2 + \mu^2} \right\} \cdot e^{-Kk^2 t} \quad \text{---- (3.30)}
\end{aligned}$$

となる。すなわち(3・29)式によって供試体の各点(x, y, z)の、(3・30)式によって供試体全体の含水量の時間的な変化を計算することが可能である。

(2) 拡散係数(K)および蒸発係数(μ)の決定法

前節で求めた(3・29)式および(3・30)式には、拡散係数Kと蒸発係数 μ が変数として含まれている。これらの値は実験の結果から決定しなければならない。また供試体から逸散し得る水量、すなわち全逸散可能水量 C_0 も決定しなければならない。 C_0 の決定は実験結果をもとにしてつぎのような手法で行なう。

図-3・7および3・8に示した、逸散水量と時間との関係を表わす曲線を(3・31)式で近似し、その定数A、Bを最小二乗法によって決定する。

$$f(t) = \frac{t}{A + B t} \quad \text{----- (3・31)}$$

ここに、 $f(t)$: 時間 t における逸散水量

t : 試験開始からの時間(日)

A, B : 実験定数

(3・31)式において、 $t \rightarrow \infty$ とすれば、

$$f(\infty) = \frac{1}{B} \quad \text{----- (3・32)}$$

となり、 $f(\infty)$ が全逸散可能水量 C_0 を与えることになる。

このようにして求められた各供試体の C_0 を表-3・6に示す。表-3・6によれば、同一のコンクリートであっても、環境の湿度条件および表面の被覆の有無によって C_0 の値が異なる。しかし逸散可能水量は同一コンクリートでは湿度条件や表面の被覆の状態にかかわらず一定と考え、以下の考察においては湿度50%で表面を被覆しない供試体から推定された水量、すなわち普通コンクリート、ライオナイトコンクリートおよび宇部軽骨コンクリートでそれぞれ、215g、323gおよび685gとする。なお環境条件や被覆の影響は蒸発係数 μ に含まれていると考える。

つぎに図-3・7および3・8に示した逸散水量を上述の各 C_0 に対する割合で示し、この W/C_0 を逸散率とよぶ。このようにして実験結果より逸散率と時間の関係を示す曲線が得られる。図-3・14にその一例を示した。

一方、(3・30)式に適当な μ およびKを与えることによって、供試体中の含水量の時間的な変化が求められ、またそれをもとにして逸散率、時間曲線(理論値)が得られる。 μ およびKの種々の組合せにより無数の逸散率-時間曲線が求められることになる。そのようにして得られた

逸散率一時間曲線の一例を図-3・15に示す。

なお(3・30)式の計算は鳥取大学設置の電子計算機TOSBAC-3400を用いて行ない、 n, l, m につきそれぞれ第20項まで計算した。

このようにして得られた種々の μ および K に対する逸散率一時間曲線(理論値)と先に実験結果より求められた逸散率一時間曲線を比較し、両者が一致するものを選び、そのときの μ および K を求めた結果を表-3・7に示す。

表-3・7からも明らかなように、測定期間100日間を通じて、蒸発係数と拡散係数のただ一つの組合せを求めることは不可能であった。すなわち、拡散係数は時間とともに小さくなる傾向がある。このような傾向は岡田と川村のソイルセメントの乾燥収縮に関する研究¹⁵⁾においても指摘されている。このように K が減少するのは時間とともに供試体中の含水率が低下するためであると思われる。しかし、 K が含水率の関数であるとするれば元の拡散方程式(3・1)式は非線形になる。ところが K が時間の関数であると考えれば拡散方程式は線形であり、さらに解(3.29)式および(3・30)式が得られるためには蒸発係数 μ が時間にかかわらず一定としなければならない。そこで蒸発係数 μ は測定期間を通じて一定とし、拡散係数 K が時間とともに変化するものと考えて、理論曲線と実験曲線が一致するよう蒸発係数 μ と拡散係数 K とを決定した。

(3) 拡散係数(K)および蒸発係数(μ)に関する考察

表-3・7によれば拡散係数(K)は環境の湿度条件およびコンクリート表面の被覆の有無等により若干異なった値をとる。まず湿度50%の場合には測定開始後ほぼ10日目前後を境にしてその値が小さくなる。また、表面を被覆しない供試体の拡散係数の低下の割合は大きく、乾燥の初期と後期では水分の逸散機構が異なることがうかがわれる。3・4で前述したごとく、環境の湿度が低く、表面被覆のない供試体ではある時点を経境にして水分の逸散機構が異なることを示したが、本節においても同様の傾向がみられる。なお図-3・9では水分の逸散機構が異なるのは測定開始後20～40日目であったが、ここでは便宜上10日目を境にして拡散係数を決定した。

表面を被覆した供試体についても10日目を境にして拡散係数を決定したが、その低下の割合は被覆のない供試体の拡散係数の低下の割合に比較して小さく、水分の逸散機構の変化はそれほど顕著なものではないと思われる。

一方、環境湿度80%の場合はさらに細かく期間を分け拡散係数が決定されたが、拡散係数の時間とともに低下する傾向は湿度50%の場合と同様で、供試体表面の被覆の有無によって、低下の割合が異なる。

つぎに蒸発係数 (μ) について考察する。蒸発係数はコンクリートの種類、環境の湿度条件および供試体表面の被覆の有無などによって定まる定数であると考えられるが、実験結果をもとにして決定した結果 (表-3・7) によれば、それら諸要因の影響をかなり明確に表わしている。すなわち、環境の湿度が低いほど蒸発係数は大きく、供試体から外部への水分の蒸発がしやすいことがわかる。また、表面被覆のある供試体よりも被覆のない供試体の蒸発係数の方が大きい。

軽量コンクリートの蒸発係数は、表面被覆のない供試体ではすべて普通コンクリートの蒸発係数よりも大きく、水分が蒸発しやすいことがわかるが、表面を被覆した供試体の蒸発係数の普通コンクリートと軽量コンクリートとの間の相違は明瞭でない。

(4) 乾燥にともなうコンクリート中の含水率の分布についての考察

表-3・7 で得られた拡散係数および蒸発係数を (3・29) 式に代入することによって乾燥にともなうコンクリート中の任意の場所における含水率の分布の状態を求めることが可能である。

まず、図-3・16 に示した供試体の端部 (太い実線で示す) と中央部 (太い破線で示す) における乾燥にともなう含水率の変化を示したのが図-3・18～3・20 である。図-3・18～3・20 は、それぞれ、普通コンクリート、ライオナイトコンクリートおよび宇部軽骨コンクリートの、環境湿度 50%、表面被覆なしの場合についてのみ示したものである。さらに、図-3・21 に供試体の代表的な三点の含水率の時間的な変化の状況を示した。すなわち、供試体の中央断面の図心位置と上表面および端部の上表面の三点の含水率と時間の関係を示したものである。

図-3・18～3・20 および図-3・21 によれば、乾燥の初期においては供試体表面および表面に近い点の含水率が急激に低下することがわかる。またそれはコンクリートの種類によっても若干異なり、普通コンクリートよりも軽量コンクリートの方が顕著である。これは乾燥の初期においては骨材中の遊離水や表面近くの毛細管空げき中の水分の蒸発が支配的であるためと思われる。なおライオナイトコンクリートに比較し宇部軽骨コンクリートの含水率の低下が小さいのは、蒸発する水量は多いにもかかわらず骨材中に有する水量が多いためであると思われる。一方、供試体内部の含水率は、乾燥の初期においてはごくわずかに低下するだけで、コンクリートの種類による差異もほとんどみとめられない。

乾燥がある程度進むと供試体表面の含水率の低下率は徐々に小さくなるが、逆に供試体内部の含水率の低下率の方が大きくなる。すなわち、乾燥の初期に生じた内部と表面との湿度勾配を徐々に減じながら水分が逸散する。また供試体表面の含水率のコンクリートの種類による差は徐々に小さくなっていくが、内部のそれは大きくなる。

以上述べたことを総合すると、環境の湿度が50%程度の低湿下においては、最初のうちはコンクリート表面に近い点の水分やそれを補う骨材中の水分などの蒸発が支配的であり、蒸発係数(M)の影響があらわれるが、ある程度乾燥が進めば、乾燥の初期に生じたコンクリート内部と表面との間の湿度勾配に起因する拡散現象によって水分が内部から表面へ移動し逸散するようになり、拡散係数(K)の影響があらわれるようになると考えられる。

つぎに、環境湿度50%、表面被覆のない普通コンクリートの場合のみにつき、乾燥にともなう供試体内部の含水率の変化をさらに詳しく図示したのが図-3・22～3・29である。すなわち、供試体の対称性を考慮し、図-3・16に示した供試体の1/8の部分を対象とし、上表面より深さ方向($a:cm$)に1cm間隔にとった5断面(図-3・17参照)の各点における含水率の時間的な変化を示したものである。図-3・22～3・29によれば、供試体の長手方向の含水率の変化は、端部にごく近いところ、すなわち端部より2～3cm程度のところで急激に変化しているだけで、それより内側ではほとんど変りない。したがって本実験で用いた供試体のような形状、寸法のものでは水分の逸散は端部に近い点を無視するならばほぼ2次元的なものと考えてよいようである。なお含水率の時間的な変化の様相については前に述べたのと同様である。

3.6 乾燥収縮と逸散水量との関係と乾燥収縮の生成機構についての考察

図-3・30～3・32は各供試体の100日間にわたる乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係を示したものである。そのうち、図-3・30は、表面を被覆しない供試体の環境湿度50%における結果を示したものである。図-3・30より明らかなように、環境の湿度が低い場合には、コンクリートの種類にかかわらず乾燥収縮ひずみは逸散水量の増大に伴って直線的に増加し、ある値をすぎるとその直線の勾配は大きくなる。すなわち、両者の関係は一つの折線ないしはそれに近い曲線で表わされる。また、直線の勾配はコンクリート中の水分が多くなるにしたがって小さくなっている。

Pickett²⁾や吉田³⁾は、コンクリートの乾燥収縮ひずみと逸散水量は比例する、すなわち、両者の関係は直線で表わされるとしているが図-3・30に示すように、環境の湿度が低い場合には両者の関係は折線で表わされる。コンクリートの乾燥収縮が乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散に起因するとしても、その機構は二つの違った機構からなることがわかる。

乾燥の初期においては、水分の逸散が多いにもかかわらず乾燥収縮ひずみはそれほど増大しない。しかもその傾向は、骨材中の水分の多いコンクリートほど著しい。つぎの段階になれば、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみの増加の割合が大きくなる。このような現象は、前に述べた水分の逸散機構と関連づけて考えることができる。すなわち、最初の段階においては、骨材中の水分や毛

細管空げき中の水分の逸散が支配的である。水分の逸散によって毛細管空げき中の水のメニスカスの曲率は大きくなり、それに伴って生じた張力によって骨材中の水分が毛細管空げき中へ移動し、さらに外部へと逸散する。このような過程における水分の逸散はコンクリートの体積変化にそれほど影響しないため、乾燥収縮ひずみの増加は少なくなる。乾燥が進むと、前節で明らかにしたように、コンクリート表面に近い点と内部との湿度差は大きくなり、その湿度勾配によってゲル空げき中の水分も逸散するようになる。ゲル空げき中の水分が失われるとセメントゲルは収縮するため、この段階における水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみの増加の割合は大きくなる。

図-3・30に乾燥収縮の内部機構が変化すると考えられる点における逸散水量の値を示したが、これは図-3・9に示した水分の逸散機構が変化する点の逸散水量の値とほぼ一致する。このことからコンクリートの乾燥収縮が、コンクリート中の種々の形態の水の挙動と密接に関係することがうかがわれる。

図-3・31に環境の湿度が80%の場合の乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係を示したが、湿度が高いため水分の逸散が妨げられた結果、逸散水量も少なく機構の変化をみるにいたらず、乾燥収縮ひずみと逸散水量との間には、ほぼ直線的な関係がみられる。これは3.4で述べた水分の逸散機構の場合と同様である。図-3・32に表面を被覆した供試体の結果を示したが、宇部軽骨コンクリート以外のコンクリートでは、前に示した水分の逸散機構が変化する水量とほぼ同量の水量が逸散した時点において乾燥収縮の生成機構が変化している。

図-3・33に、同一種類のコンクリートで、環境条件および供試体表面の状態の異なる5供試体の100日目の乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係を示したものである。いずれのコンクリートにおいても両者の関係はほぼ直線で近似できる。すなわち、コンクリートの乾燥収縮は巨視的には供試体中の水分の逸散量とほぼ比例するといえる。またその直線の勾配は、コンクリートが有する水分の量が多いほどゆるやかになる。

3.7 結 論

本章においては、コンクリートの乾燥収縮の生成機構を明らかにするため、コンクリート中の水分の逸散量とそれに伴う乾燥収縮ひずみとを種々の条件下で測定した結果について論じた。実験の結果得られるものが供試体の逸散水量とひずみ（供試体の長さ変化）といういわばマクロなものであるにもかかわらず、それをもとにミクロな生成機構を説明しようと試みている点、問題がないわけではないが、できる限り実験結果に忠実に論を進めたつもりである。また、従来の研究においてはほとんどなされたことのない逸散水量の測定を行ない、その結果をもとに拡散方程式によって供試体内部の細部にわたる水分の逸散の状態を明らかにできた点、逸散水量と乾燥

収縮ひずみとの関係を示すことができた点などは、本研究の成果であると考える。

以下に、本研究の結果明らかになった点を列挙し、本章の結論とする。

- 1) コンクリートの乾燥収縮の環境湿度依存性は強く、環境の湿度が高いほど乾燥収縮ひずみは小さくなる。また、供試体表面を被覆した供試体の乾燥収縮ひずみは、被覆のない供試体のそれよりも小さい。このことより、コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート中の水分の外部への逸散に起因するものであることがうかがわれる。
- 2) コンクリート中の水分の逸散は、環境の湿度が低いほど多く、供試体表面を被覆したものや環境の湿度が高い場合には少なくなる。
- 3) 乾燥にともなうコンクリート中の水分の逸散速度は時間とともに徐々に低下するが、環境の湿度が十分に低い場合には、逸散速度の低下の割合がある時点を境にして異なる。このことから、コンクリート中の水分の逸散の機構が乾燥の初期とそれ以後において若干異なることが想像される。
- 4) コンクリート中の水分の逸散を拡散方程式で表わされるとして、乾燥に伴う水分の逸散の時間的な変化を求めた結果によれば、乾燥の初期においては、供試体表面からの水分の蒸発が盛んであり、内部と表面との湿度差が大きくなる。乾燥が進むと、供試体表面の含水量の変化はゆるやかになり、内部との湿度勾配が時間とともに低下する。すなわち、コンクリート中の水分の乾燥に伴う逸散は、最初は骨材中の遊離水や供試体表面に近い毛細管空げき中のキャピラリー水の逸散が支配的であるが、乾燥が進むと、供試体表面の含水率が低くなり、供試体内部との間に生じた湿度勾配に起因する拡散現象によってゲル空げき中のゲル水の逸散が支配的になると考えられる。
- 5) 実験結果より求めたコンクリートの拡散係数は、時間とともに低下する。またその低下の割合は供試体表面を被覆しないものほど大きい。
- 6) コンクリート表面からの水分の蒸発のしやすさを表わす蒸発係数は、コンクリートの種類、環境の湿度条件および供試体表面の被覆の有無などによって異なる。すなわち、普通コンクリートよりも軽量コンクリートの方が、環境の湿度が低いほど、さらに供試体の表面を被覆しないものほど蒸発係数は大きく、水分が蒸発しやすい。
- 7) コンクリートの乾燥収縮ひずみと逸散水量とは、環境の湿度が十分に低い場合には、折線ないしはそれに近い曲線で表わされ、乾燥の初期においては水分の逸散が多いにもかかわらず乾燥収縮ひずみはそれほど増大しないが、つぎの段階になれば水分の逸散にともなうひずみの増加の割合は大きくなる。またそれらの直線の勾配は、骨材の吸水量の多いコンクリートほどゆるやかになる。

〈 第 3 章 参 考 文 献 〉

- 1) . 例えば, D.W.Hobbs and A.R.Mears, "The influence of specimen geometry upon weight change and shrinkage of air-dried mortar specimen" Magazine of Concrete Research, Vol. 23, No 75~76, June-September, 1971
- 2) G.Pickett, "Shrinkage Stress in Concrete" Journal of the ACI, Vol. 17, No 3, January, 1946
- 3) 吉田弥七, "乾燥によるコンクリートの亀裂に関する主要性質の実験的研究(其の1)" 土木学会誌論文集, 第2号, 昭和19年6月
- 4) 西林新蔵, "人工軽量骨材コンクリートの乾燥収縮およびクリープ" 材料, Vol. 15, No 157, 1966年10月
- 5) 狩野春一他, "軽量コンクリートの乾燥収縮に関する研究" 日本建築学会論文集, 第57号, 昭和32年6月
- 6) 六車熙他, "人工軽量骨材コンクリートの収縮ひずみ" 日本建築学会論文集, 号外, 昭和40年9月
- 7) 岡田, 小柳, 阪田, "クリープの環境湿度依存性について" 土木学会コンクリートライブラリー第24号, 1969年4月
- 8) 阪田遼次, "コンクリートのクリープ機構とその要因に関する研究" 京都大学修士論文, 昭和44年3月
- 9) J.Crank, "The mathematics of diffusion" Oxford at the Clarendon Press, 1955
- 10) 草野尚, "境界値問題入門" 朝倉書店, 1971
- 11) 寺沢寛一, "自然科学者のための数学概論" 岩波書店
- 12) 既出 2) P.171
- 13) 田中楠弥太, "熱蒸気および伝熱" 技報堂, PP.109~113
- 14) W.M.Rohsenow and H.Y.Choi, "Heat, Mass and Momentum Transfer" Prentice-Hall, Inc. PP.91~92
- 15) 岡田, 川村, "ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二三の考察" 土木学会論文集, 第142号, 昭和42年6月

表-3・1 使用骨材の物理的性質

Kind of Aggregate		Specific gravity	Water absorption (%)	Weight of unit vol (kg/m^3)	F. M.
Coarse Agg	Crushed stone	270	1.21	1530	7.29
	Lionite	1.34	2.30	800	6.65
	Ube-keikotsu	1.57	1.30	843	6.51
Fine Agg	River sand	2.56	1.23	1420	2.98
	Lionite	1.37	4.00	1100	2.62
	Ube-keikotsu	1.90	11.5	1120	2.53

表-3・2 使用セメントの物理的性質

Specific gravity	Soundness	Flow (mm)	Fineness	Setting time	
			Specific Surface	Initial (hr-m)	Final (hr-m)
315	good	252	3230	2-55	4-05
Bending Strength (kg/cm^2)			Compressive Strength (kg/cm^2)		
3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
349	521	748	143	244	416

表-3・3 コンクリートの配合表

Specimen	W/C (%)	C (kg/m^3)	W (kg/m^3)	S/a (%)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)	Pozz. No. 8
Crushed stone	45	360	162	45	823	1045	C× 0.25%
Lionite	45	360	162	45	548	518	
Ube-keikotsu	45	360	162	45	601	606	

表-3・4 実験条件

Specimen	Temperature	Relative Humidity	Surface Treatment
Crushed stone	20° C	50%	sealed (s)
Lionite		80%	
Ube-keikotsu		100% (in Water)	unsealed (us)

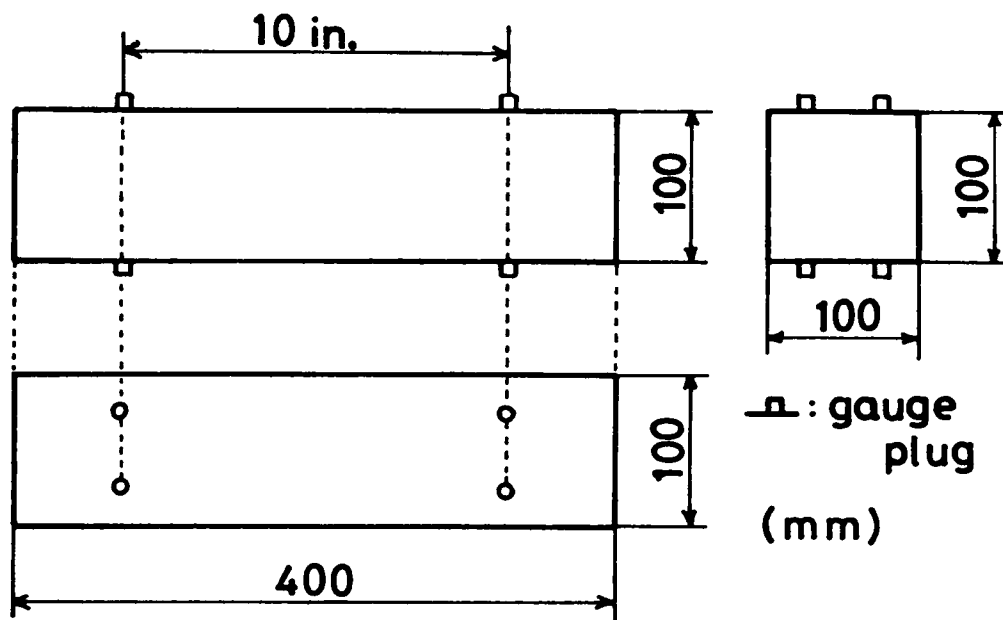


図-3・1 供試体の形状と寸法

表-3・5 実験結果

Specimen		Shrinkage	Moisture loss
Aggregate	Curing Condition	$S_{1..} (\times 10^5)$	$W_{1..} (\%)$
Crushed stone	W	6.3	—
	H-S	28.9	7.0
	H-US	39.6	9.4
	L-S	57.8	12.9
	L-US	65.0	17.7
Lionite	W	4.8	—
	H-S	28.1	9.3
	H-US	42.7	16.6
	L-S	44.2	19.5
	L-US	57.2	27.0
Ube-keikotsu	W	1.8	—
	H-S	11.2	18.0
	H-US	21.5	40.5
	L-S	16.3	29.1
	L-US	39.0	54.2

W : 100% R.H. (in water)

H : 80% R.H.

L : 50% R.H.

S : Sealed specimen

US : Unsealed specimen

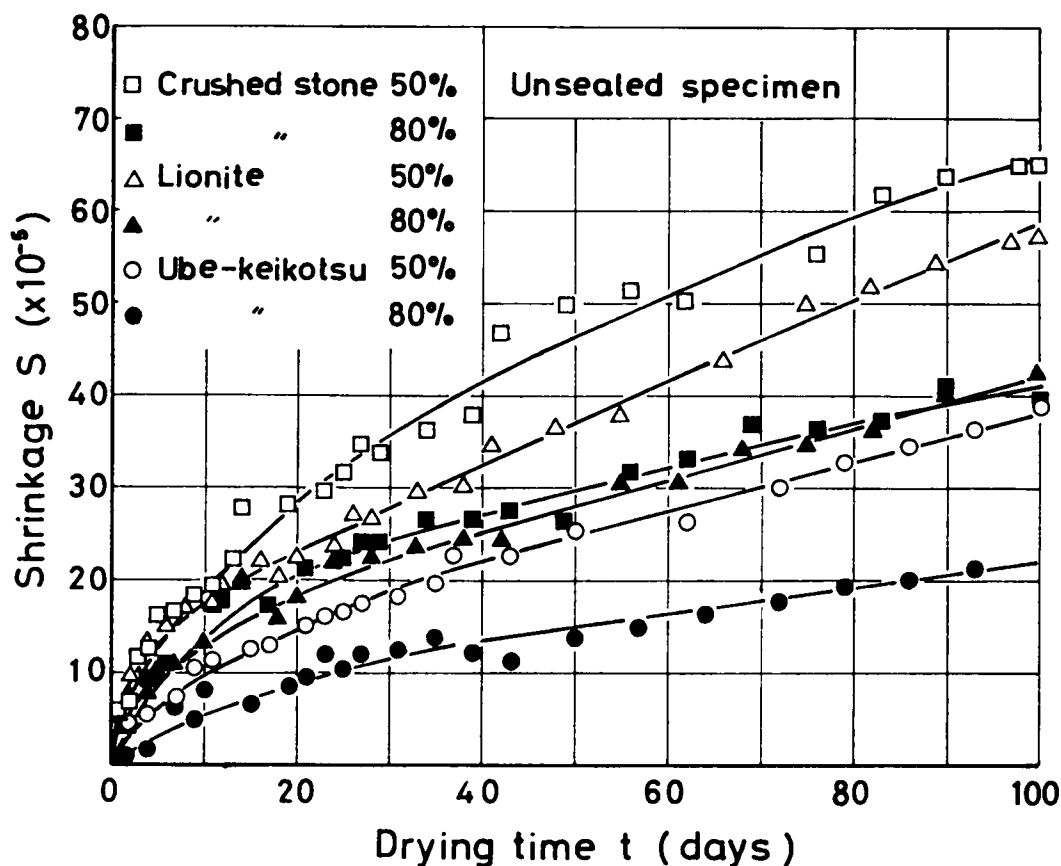


図-3・2 乾燥収縮 - 時間曲線

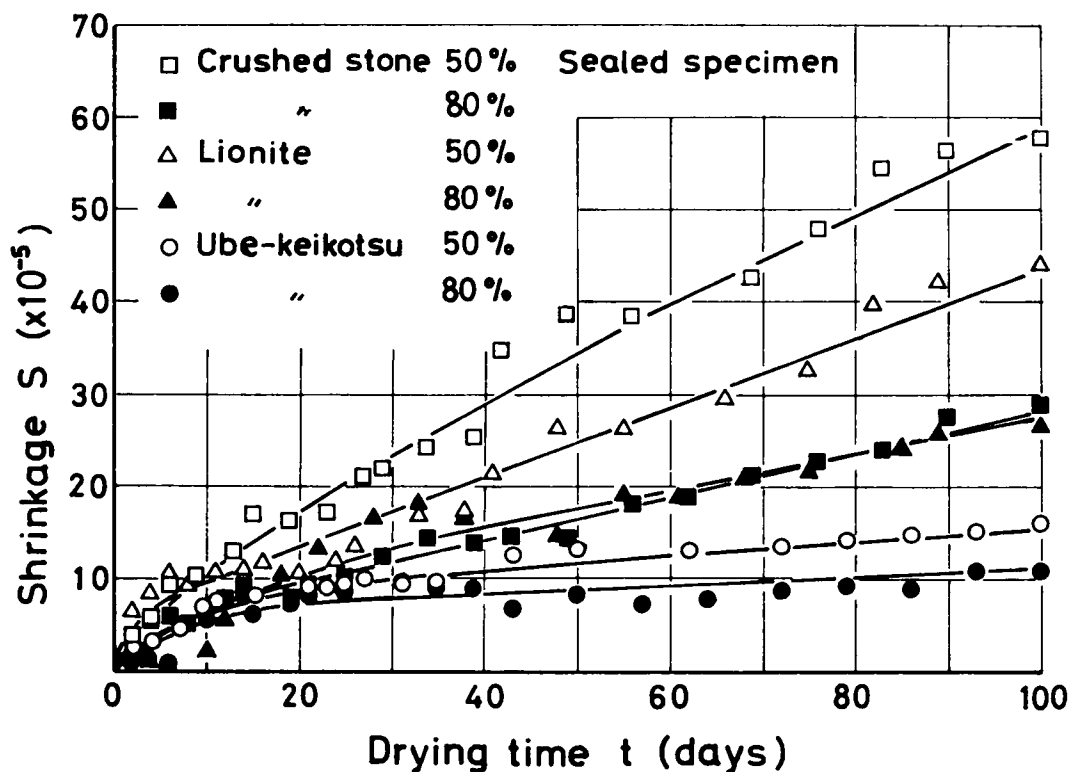


図-3・3 乾燥収縮 - 時間曲線

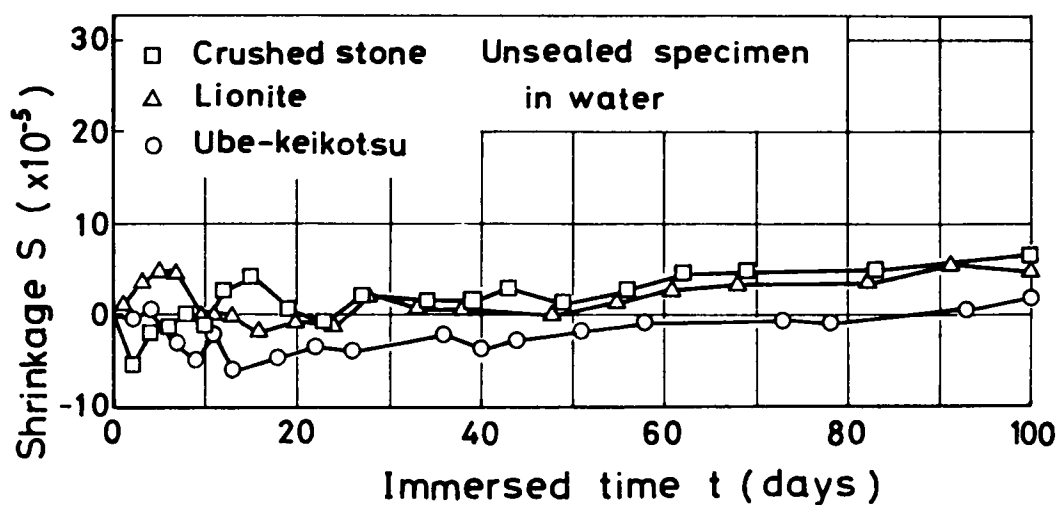


図-3・4 乾燥収縮-時間曲線

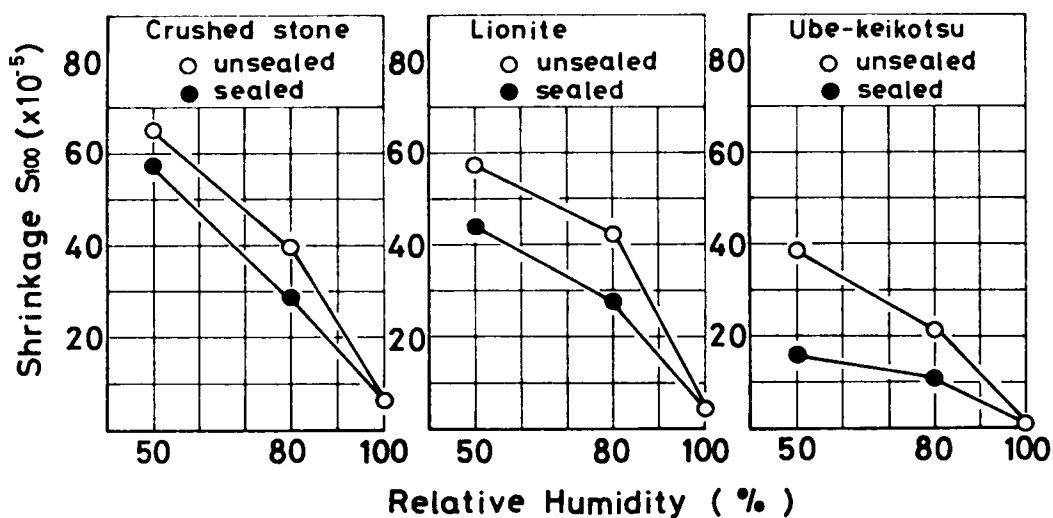


図-3・5 乾燥収縮の環境湿度依存性

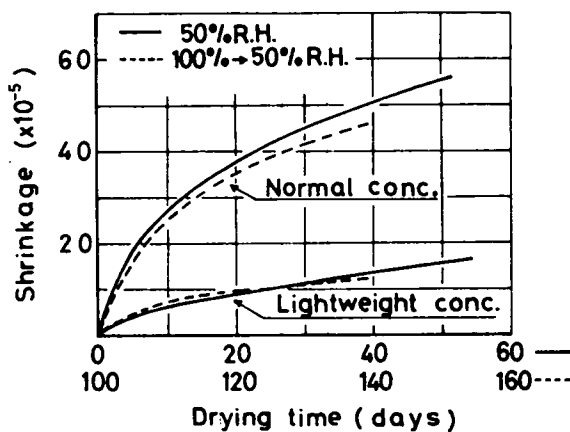


図-3・6 乾燥収縮の環境湿度依存性

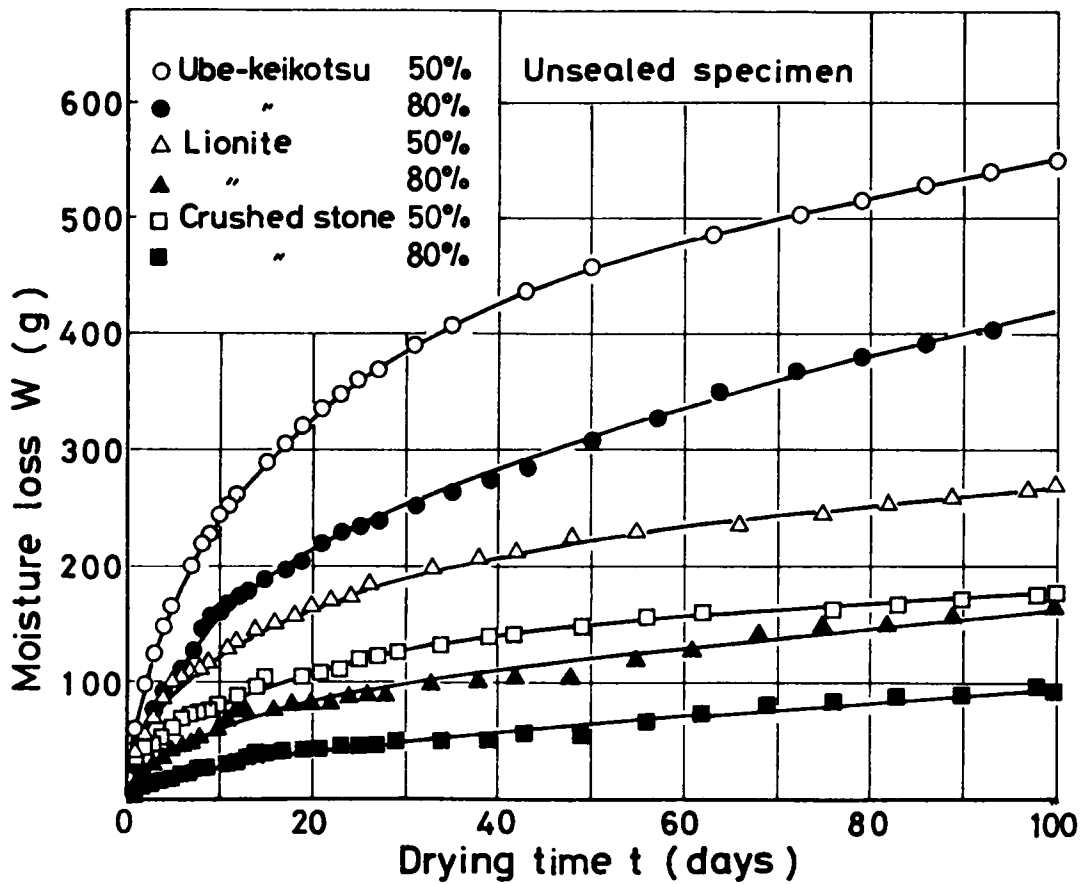


図-3・7 逸散水量 - 時間曲線

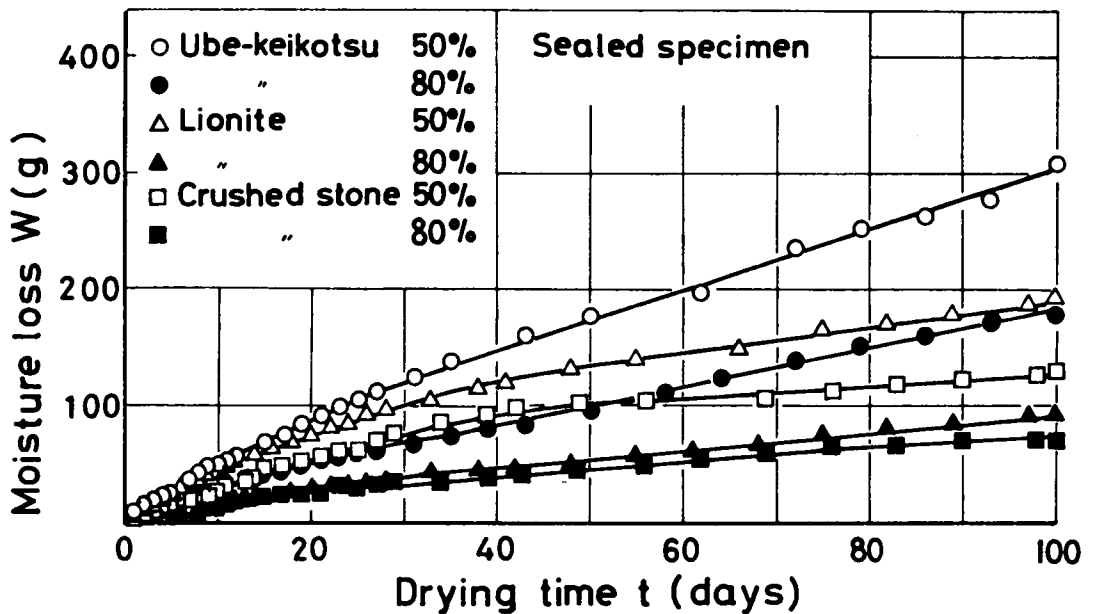


図-3・8 逸散水量 - 時間曲線

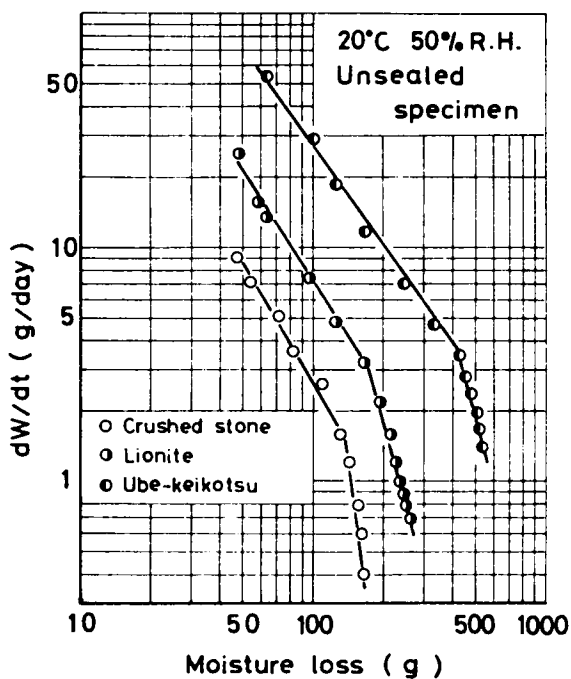


図-3・9 逸散水量と逸散速度との関係

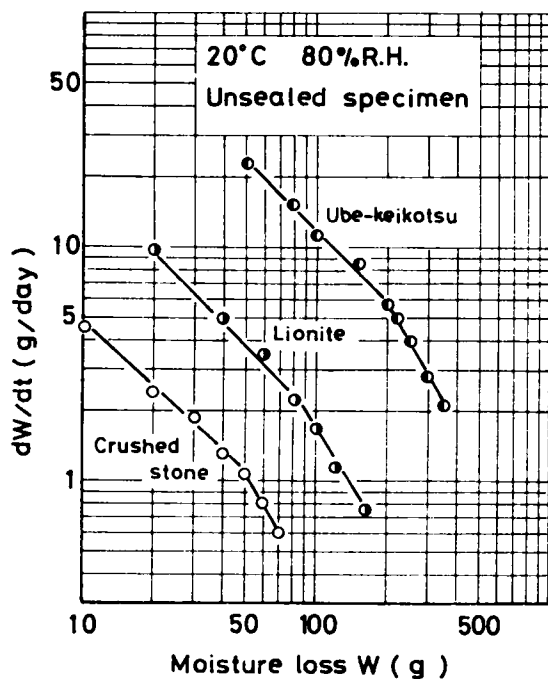


図-3・10 逸散水量と逸散速度との関係

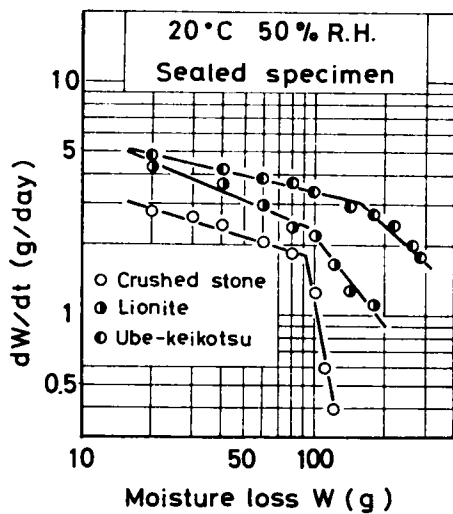


図-3・11 逸散水量と逸散速度との関係

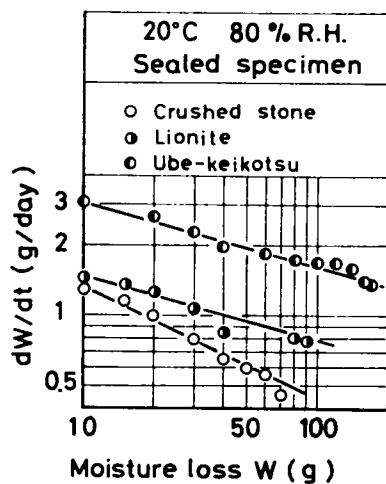


図-3・12 逸散水量と逸散速度との関係

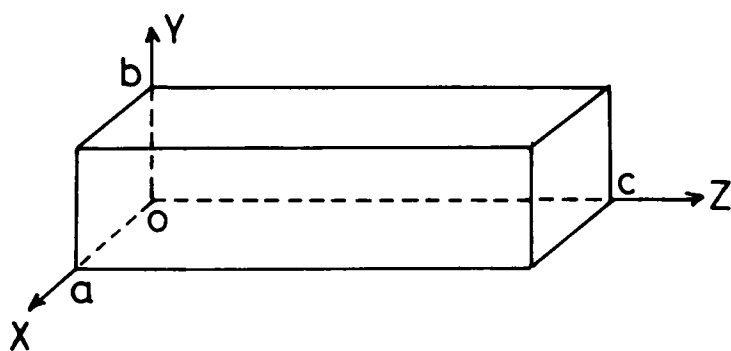


図 - 3・13 座標軸

表 - 3・6 逸散可能水量 C_o (g)

温度 供試体	50 % R.H.		80 % R.H.	
	US	S	US	S
N.C.	215	189	133	116
L.C.	323	313	230	174
U.C.	685	649	500	410

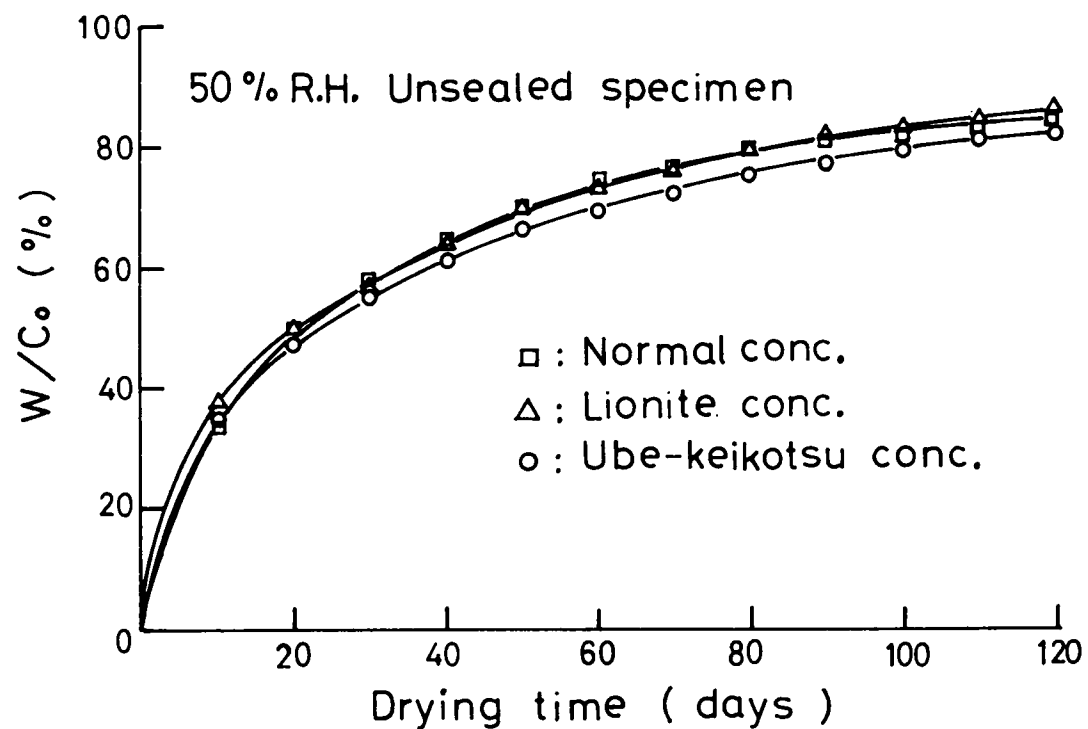


図 - 3・14 逸散率 - 時間曲線 (実験値)

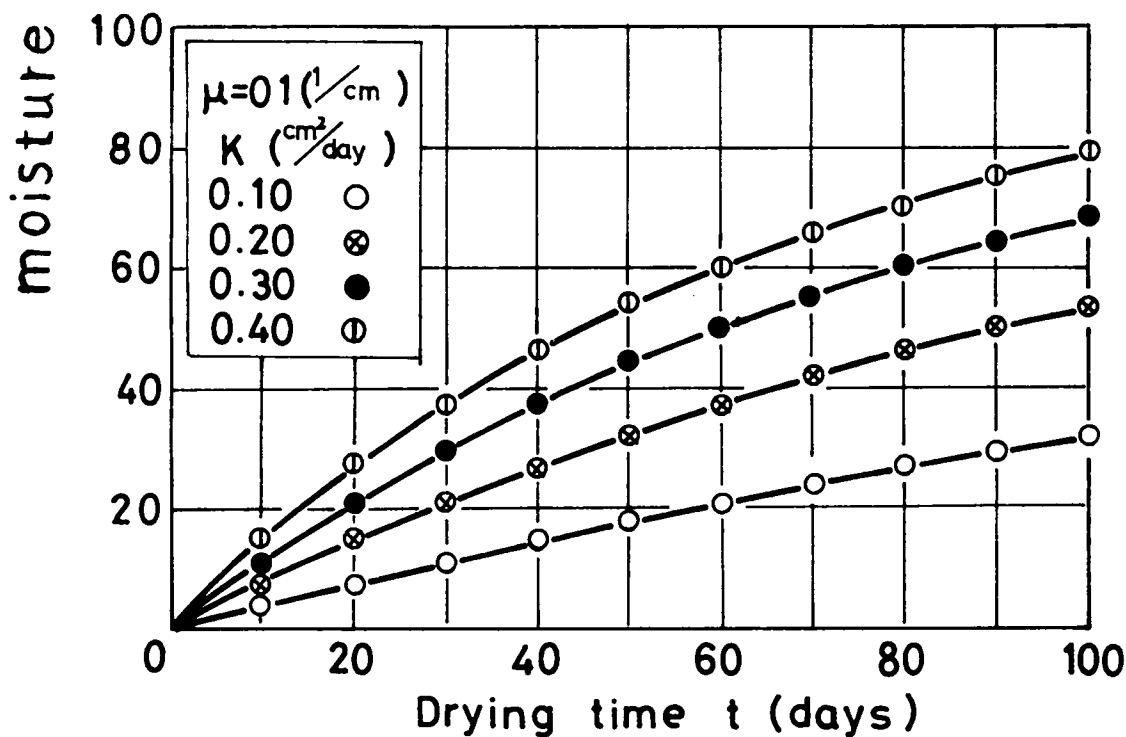
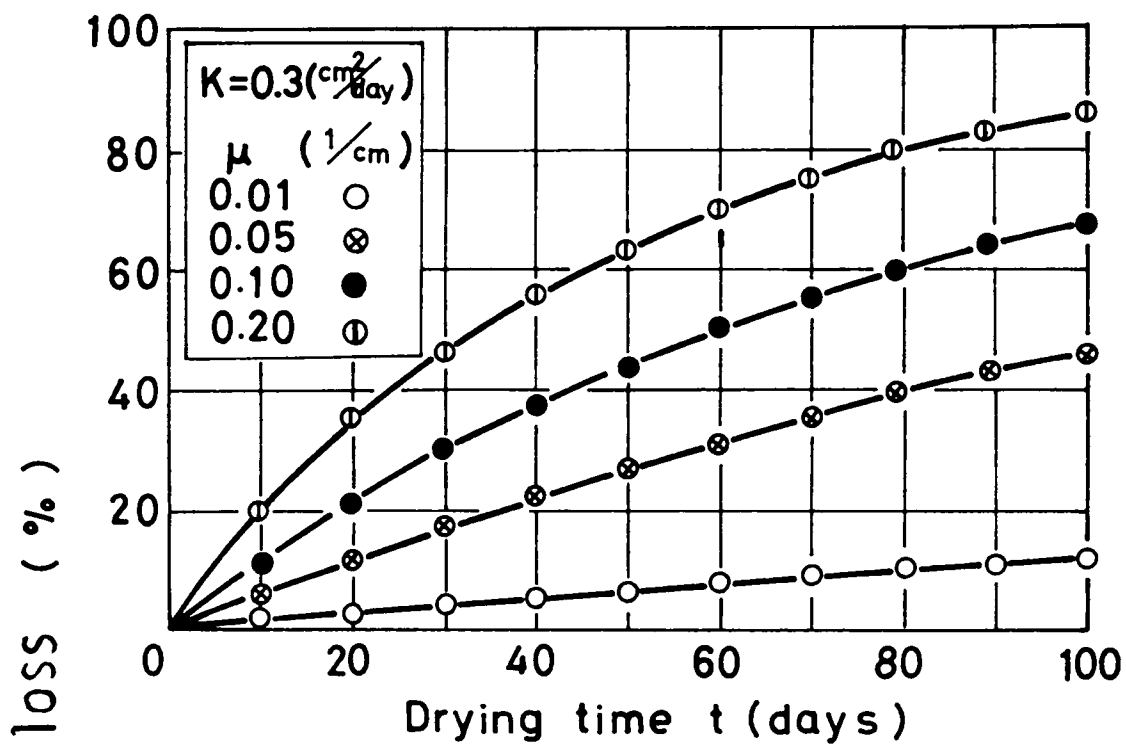


図-3・15 逸散率 - 時間曲線 (理論値)

表-3・7 蒸発係数および拡散係数

Humidity		50% R.H.			80% R.H.				
		$\mu(1/cm)$	K ($\frac{ml}{day}$)		$\mu(1/cm)$	K ($\frac{cm^3}{day}$)			
Periods(day)		0~100	0~10	10~ 100	0~ 100	0~ 10	10~ 20	20~ 50	50~ 100
Normal Concrete	US	0.46	0.30	0.16	0.08	0.30	0.21	0.20	0.13
	S	0.15	0.30	0.27	0.06	0.30	0.28	0.20	0.16
Lionite Concrete	US	0.75	0.25	0.10	0.23	0.25	0.09	0.06	0.06
	S	0.16	0.25	0.20	0.06	0.25	0.19	0.12	0.09
Ube-Keikotsu Concrete	US	0.49	0.30	0.12	0.21	0.30	0.20	0.13	0.04
	S	0.06	0.30	0.23	0.03	0.30	0.30	0.25	0.22

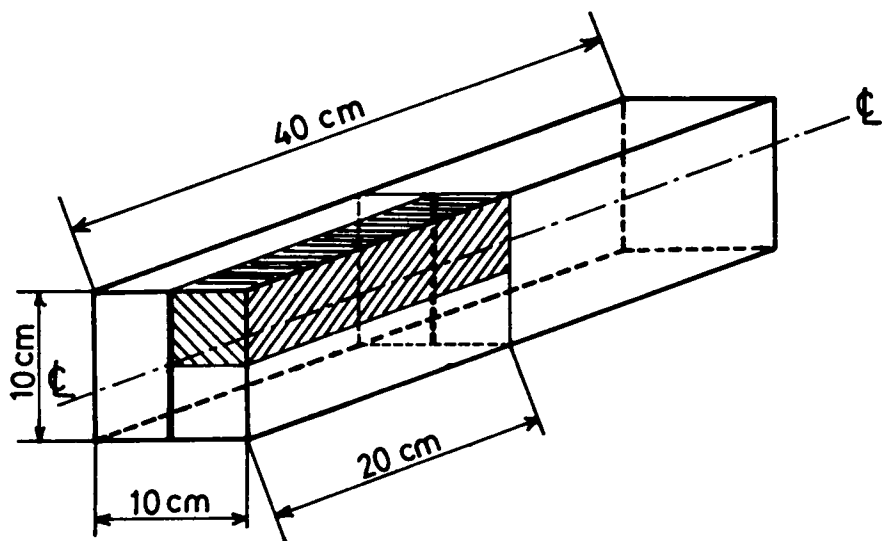


图-3·16

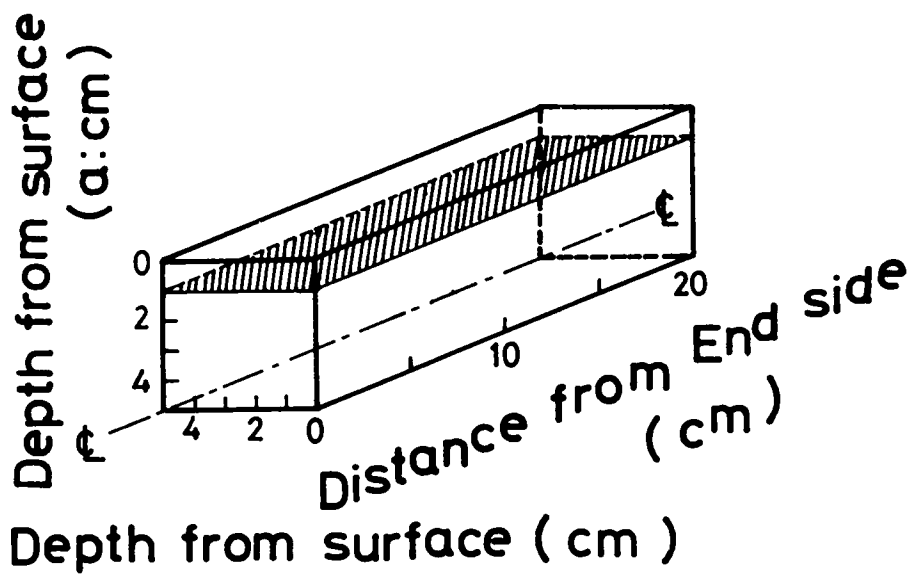


图-3·17

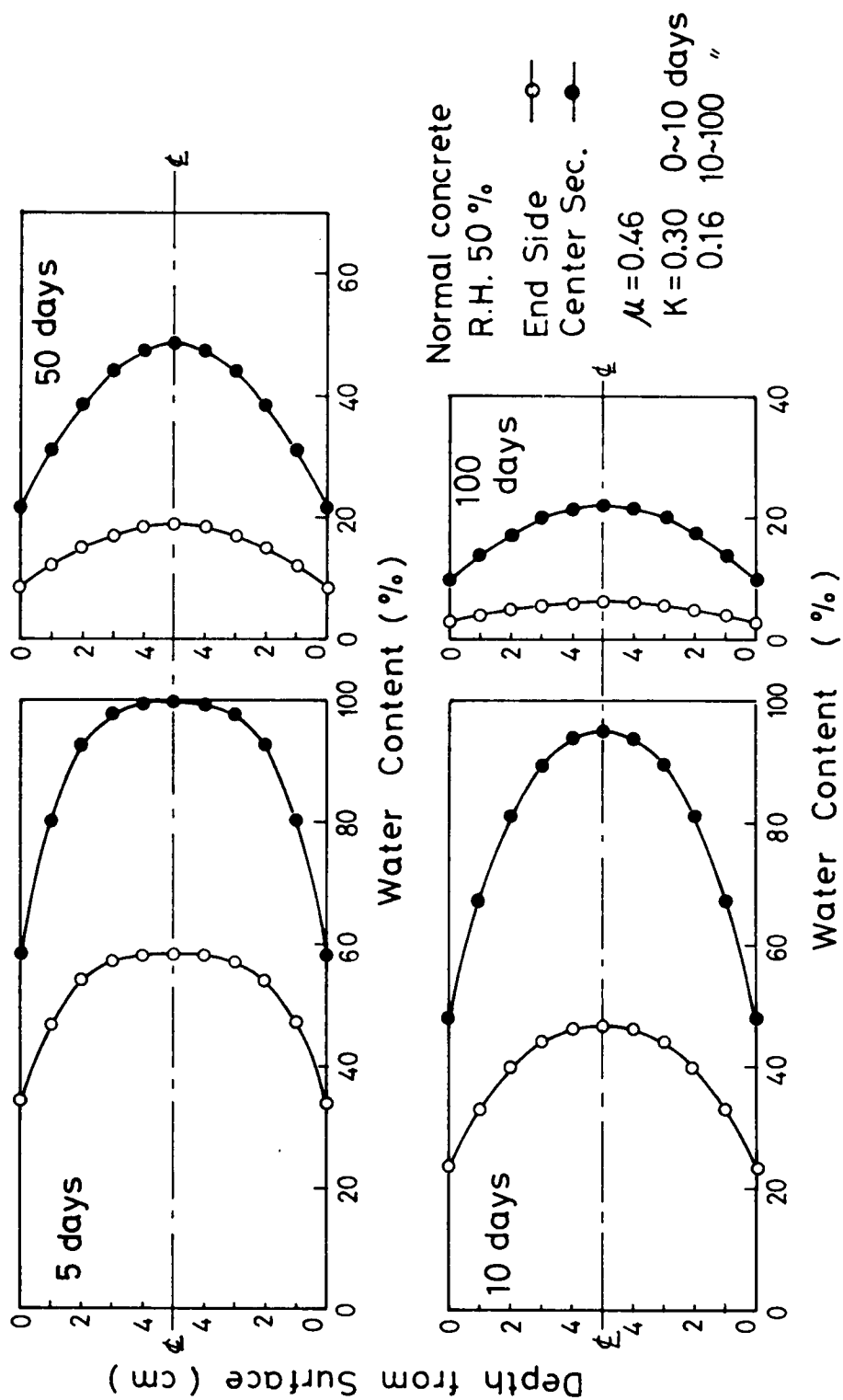


図-3・18 コンクリート中の水分の分布

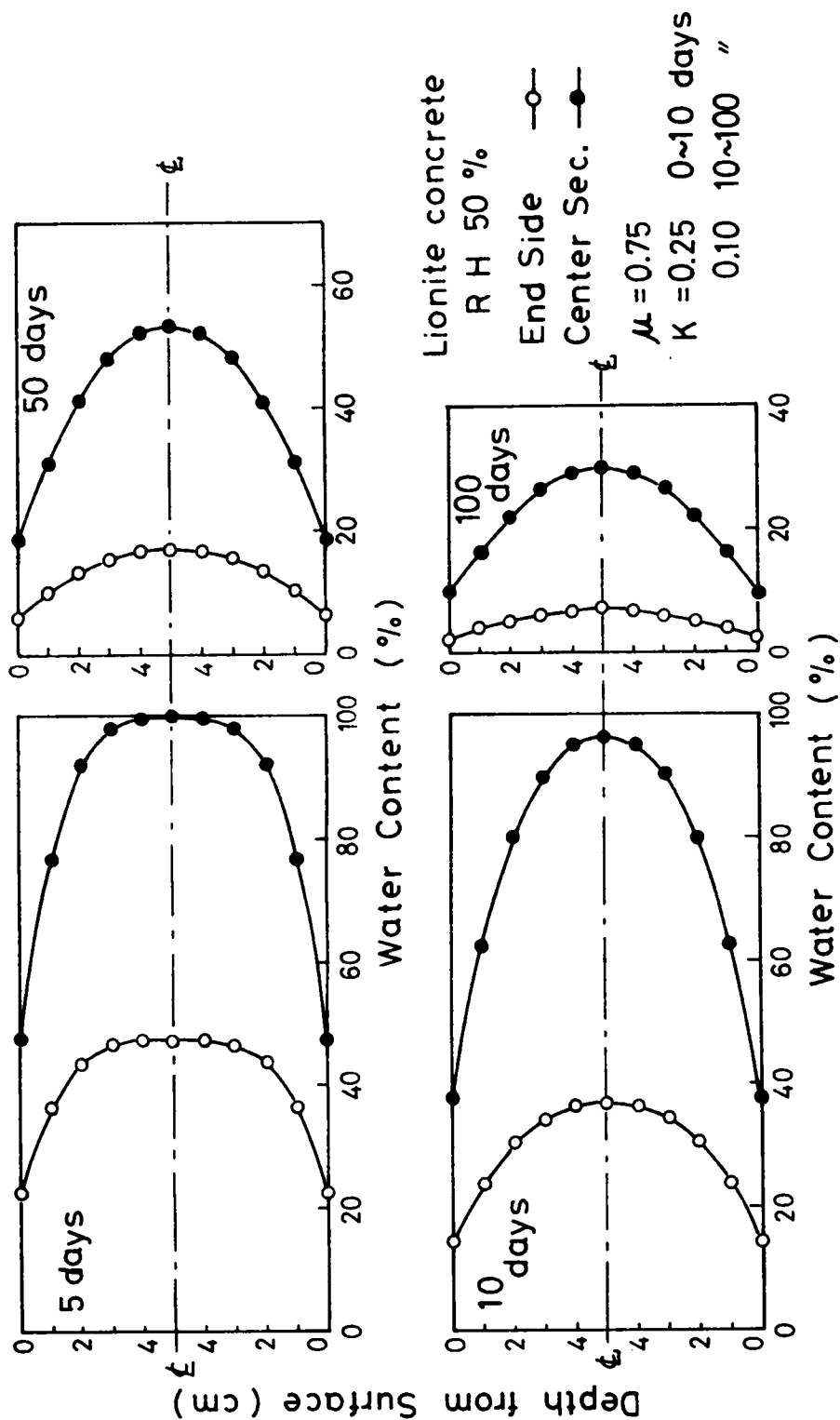


図-3・19 コンクリート中の水分の分布

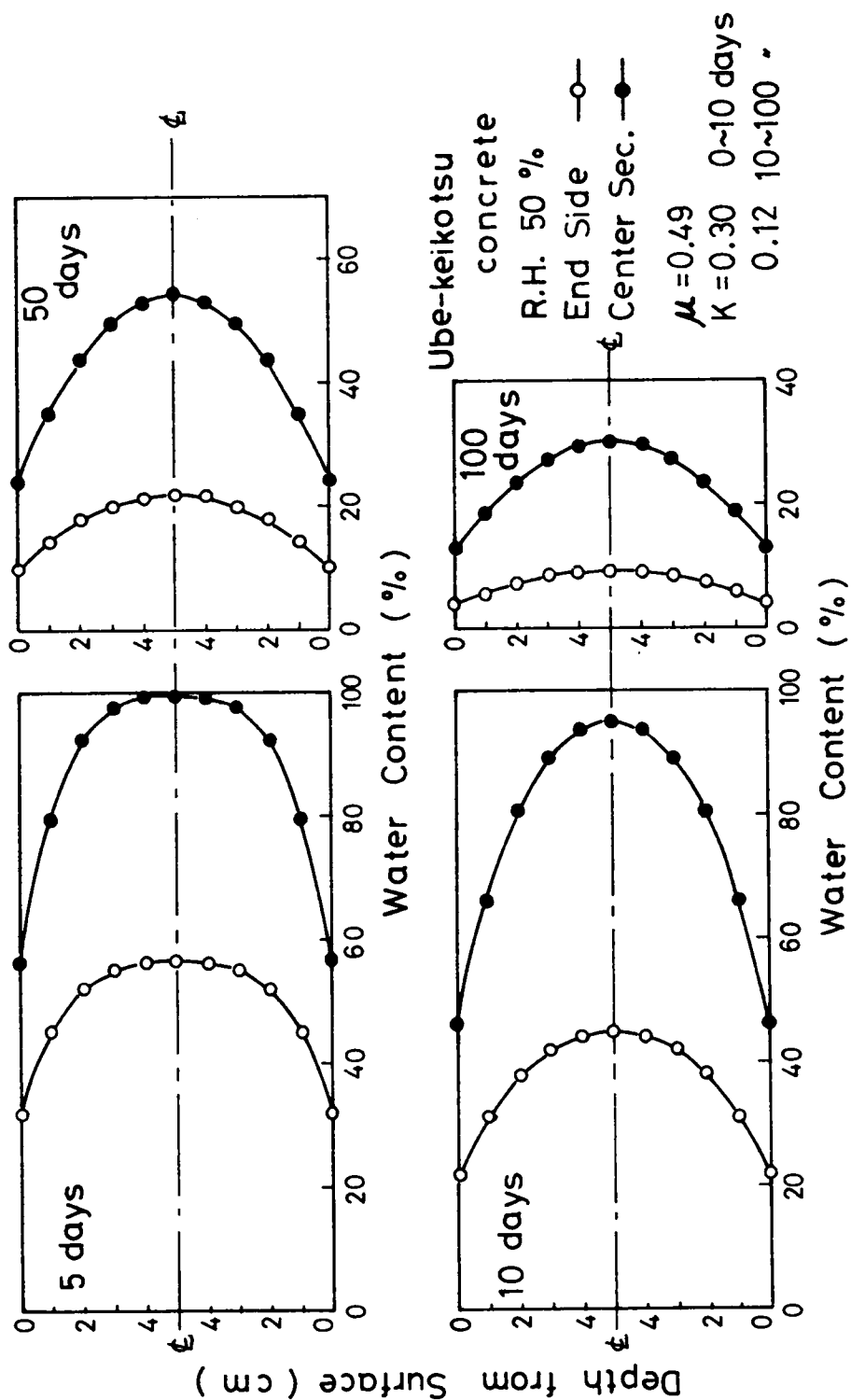


図-3・20 コンクリート中の水分の分布

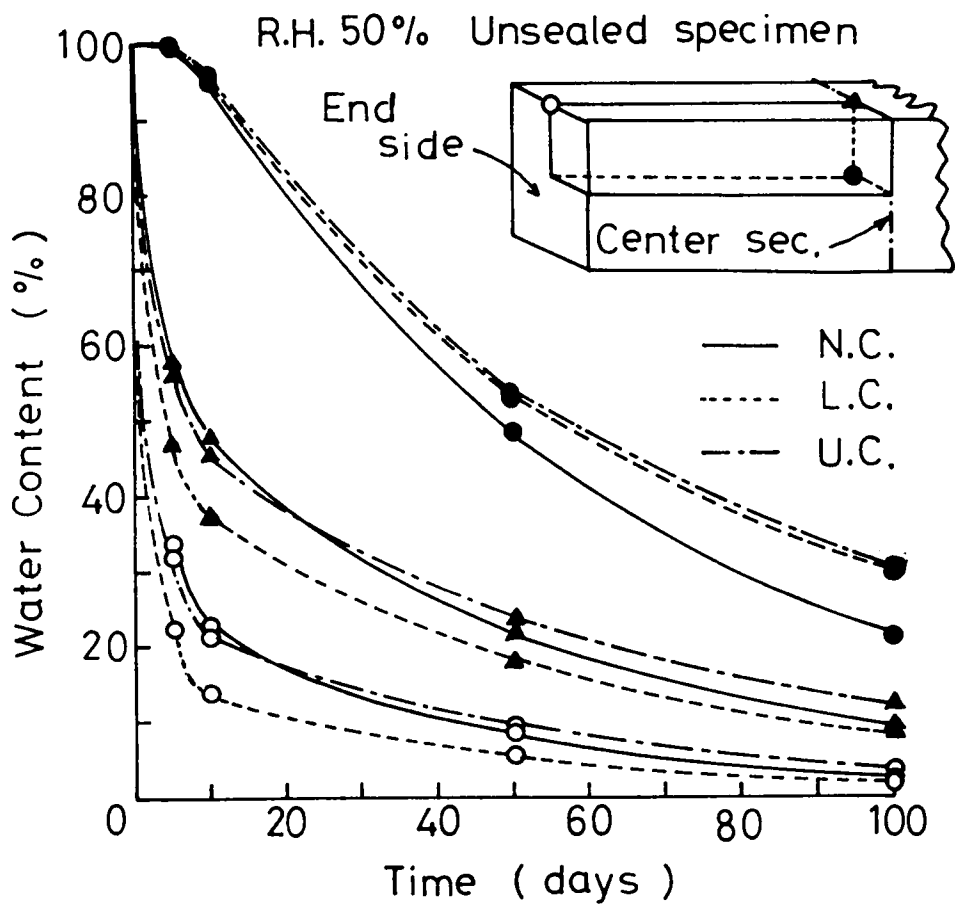
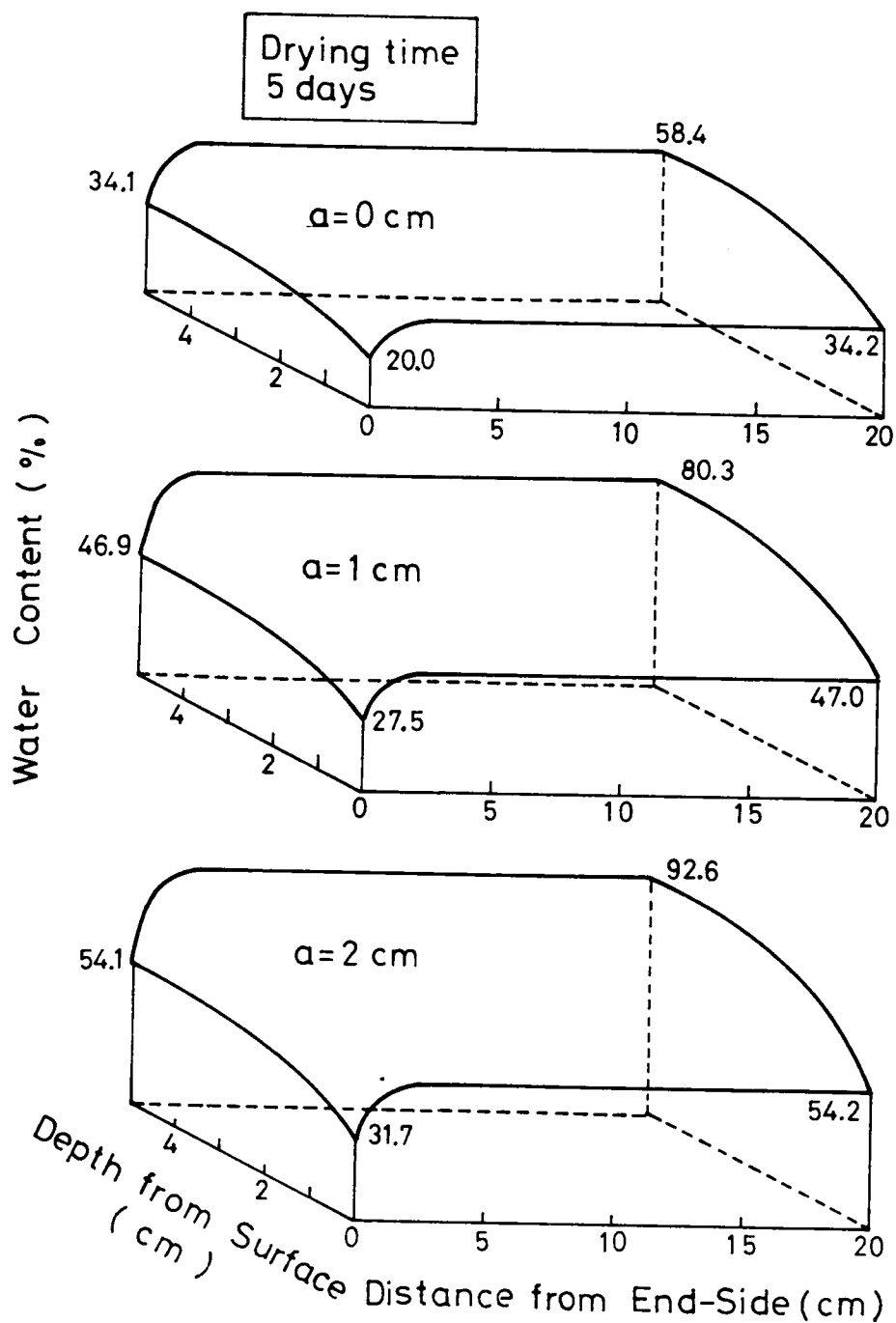


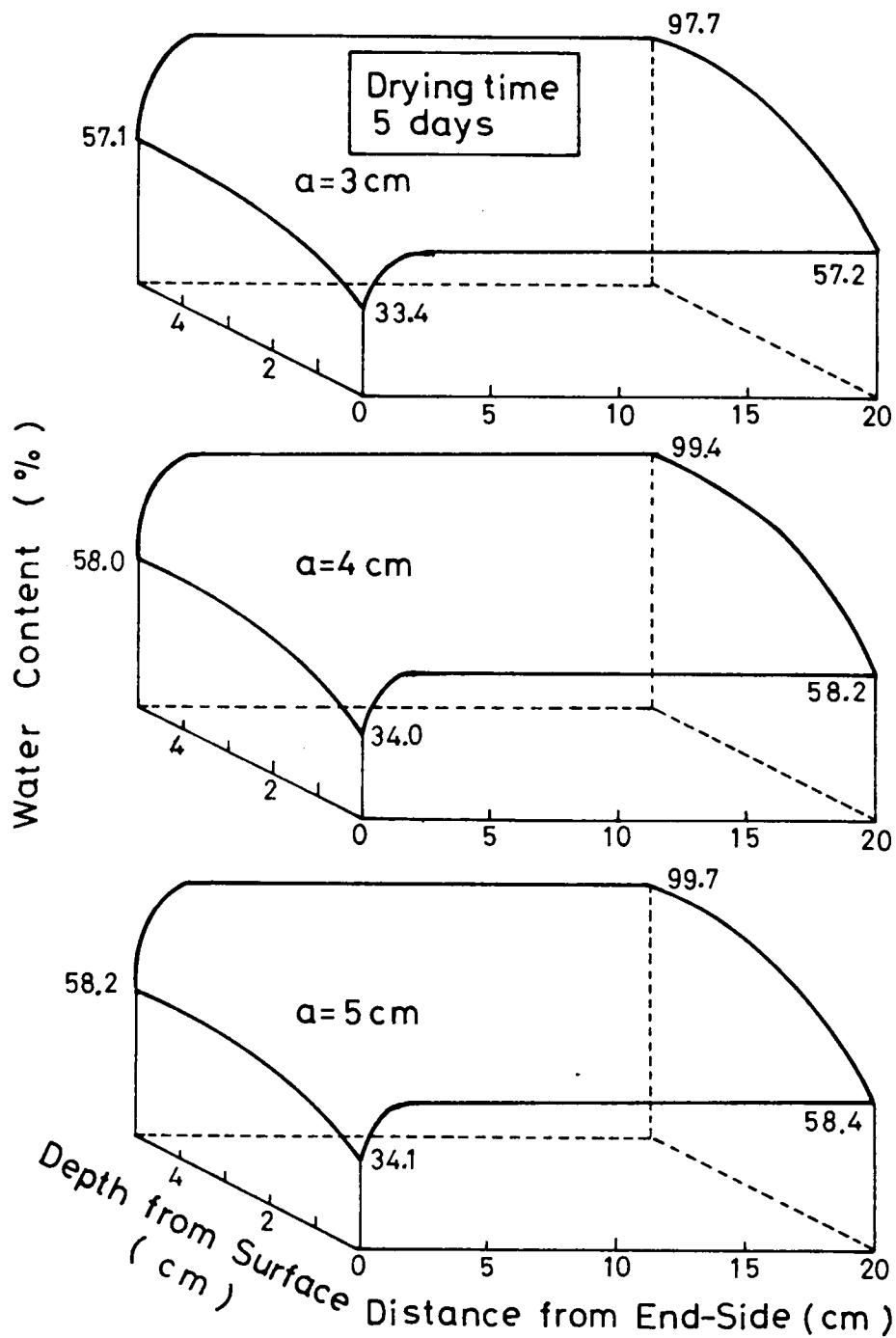
図-3・21 含水率 - 時間曲線



a : Depth from Surface

A-3・22 コンクリート中の水分の分布

(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)

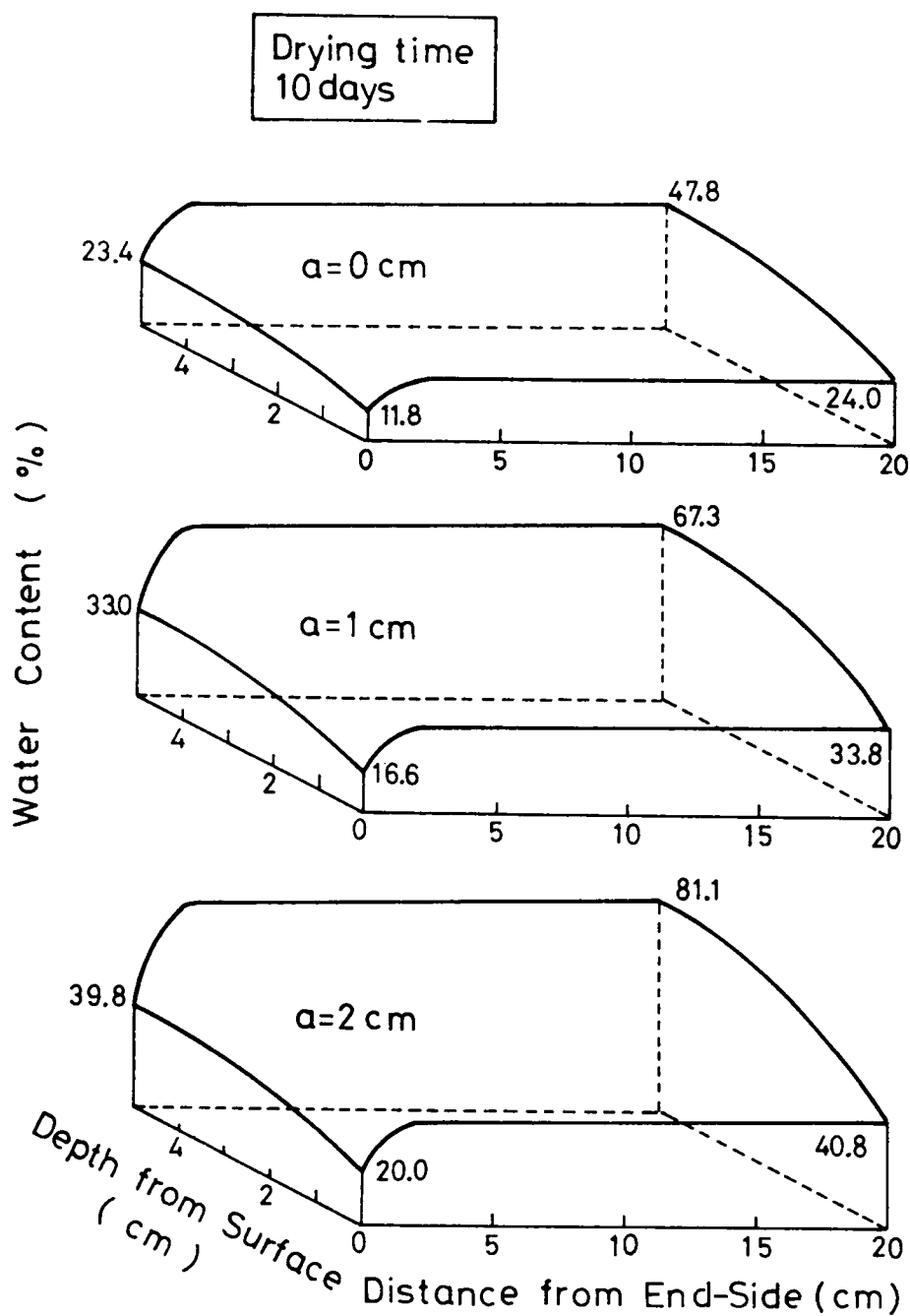


a : Depth from Surface

図-3・23

コンクリート中の水分の分布

(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)



a : Depth from Surface

図-3・24 コンクリート中の水分の分布

(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)

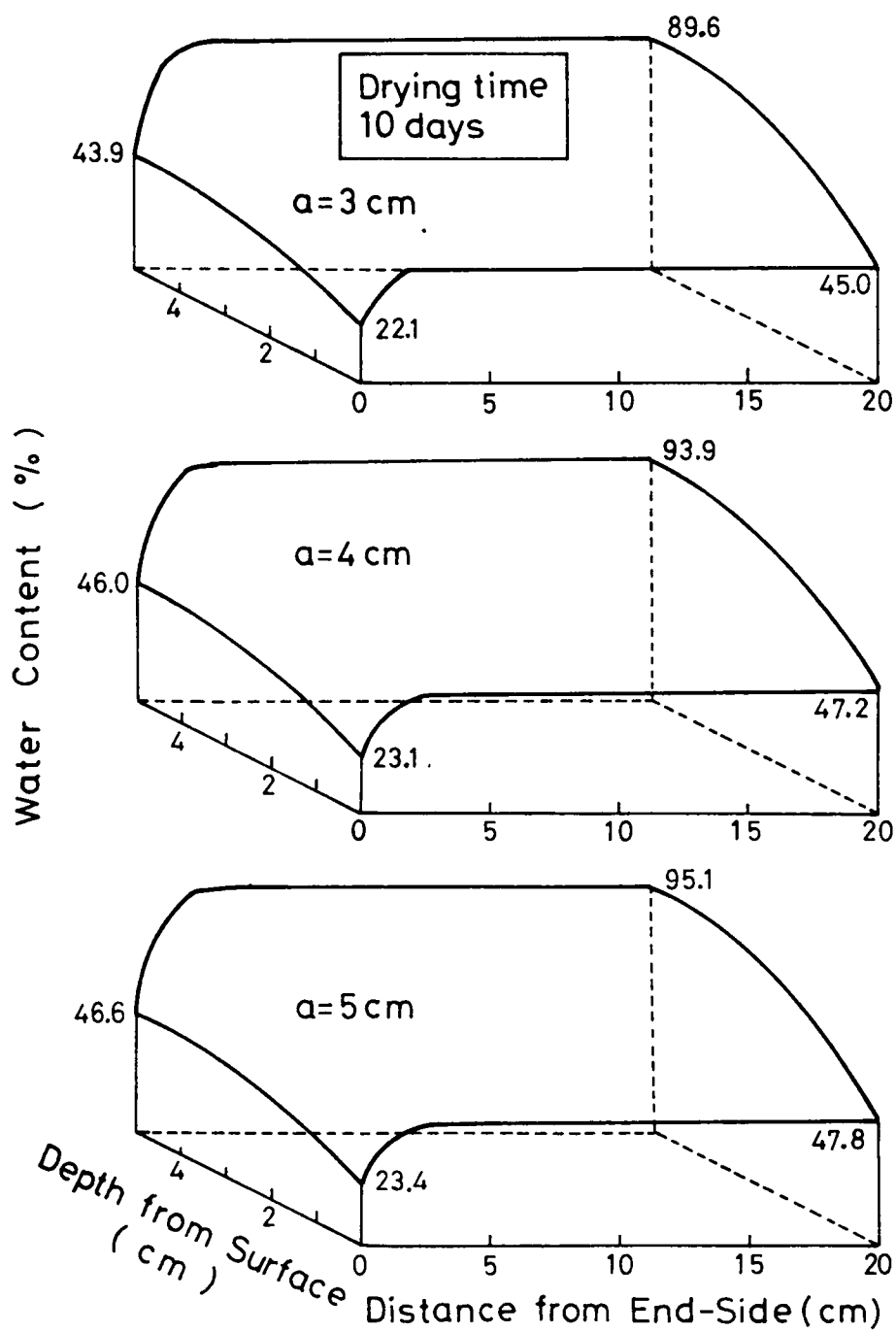
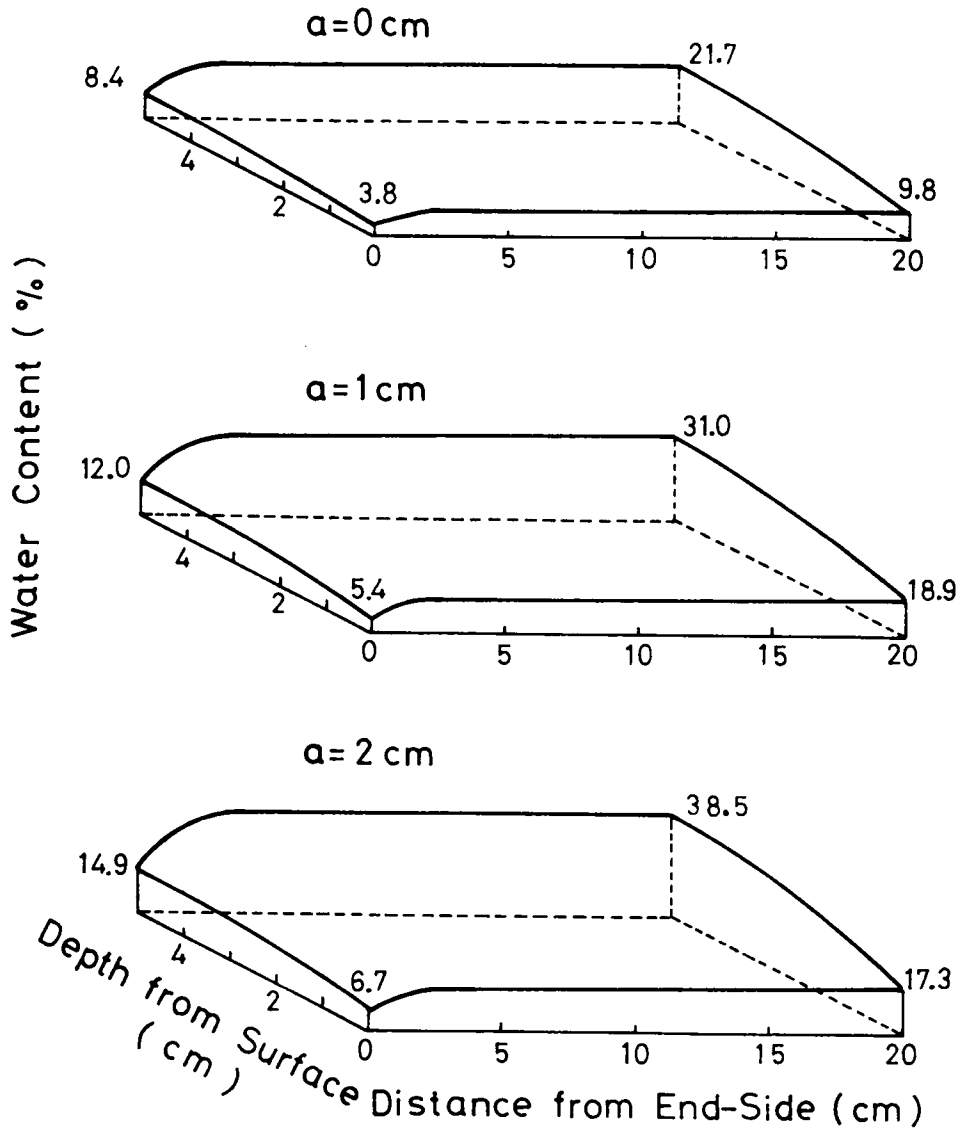


図-3・25

コンクリート中の水分の分布

(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)

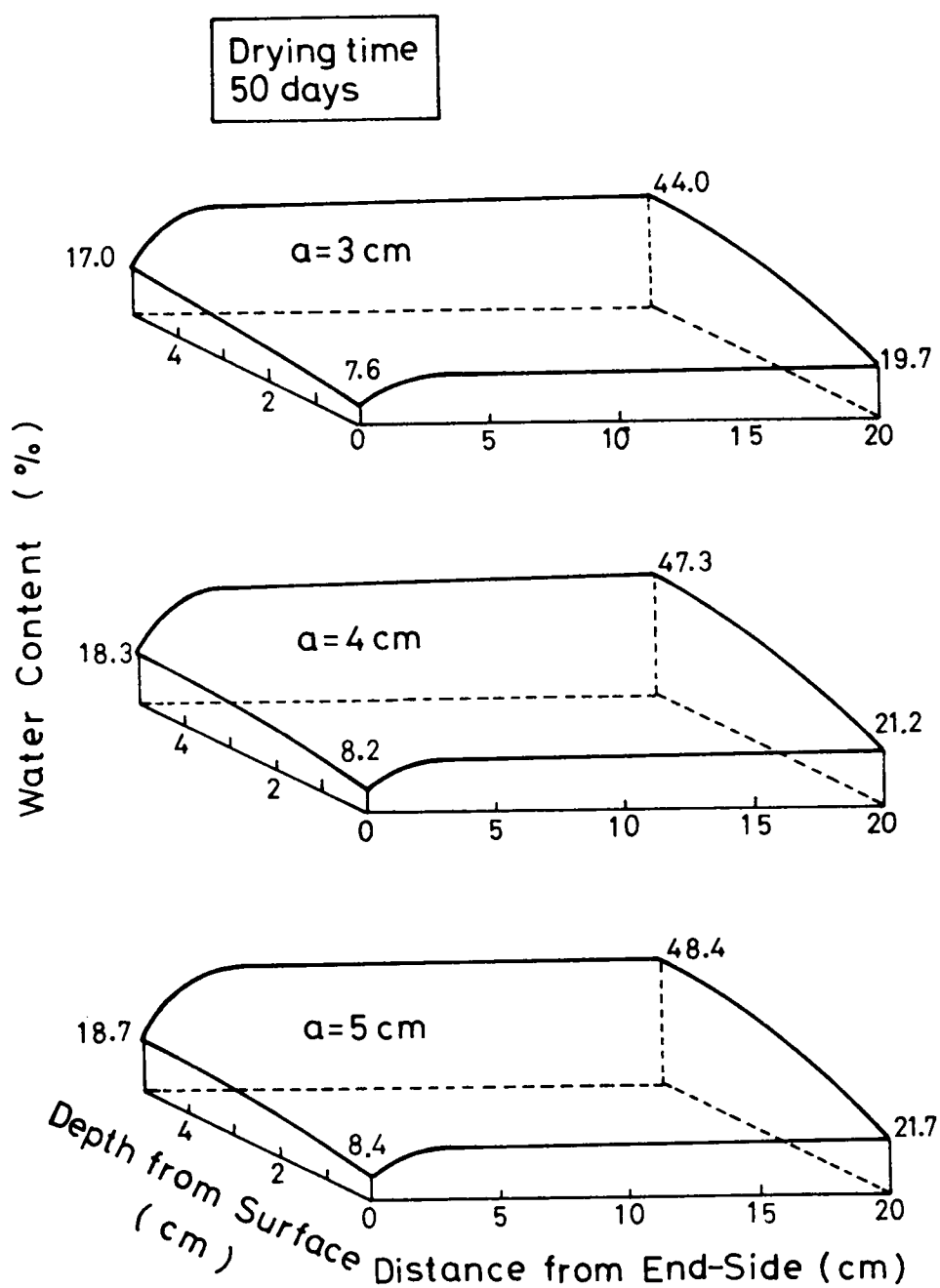
Drying time
50 days



a : Depth from Surface

図-3・26 コンクリート中の水分の分布

(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)



a : Depth from Surface

図-3・27 コンクリート中の水分の分布

(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)

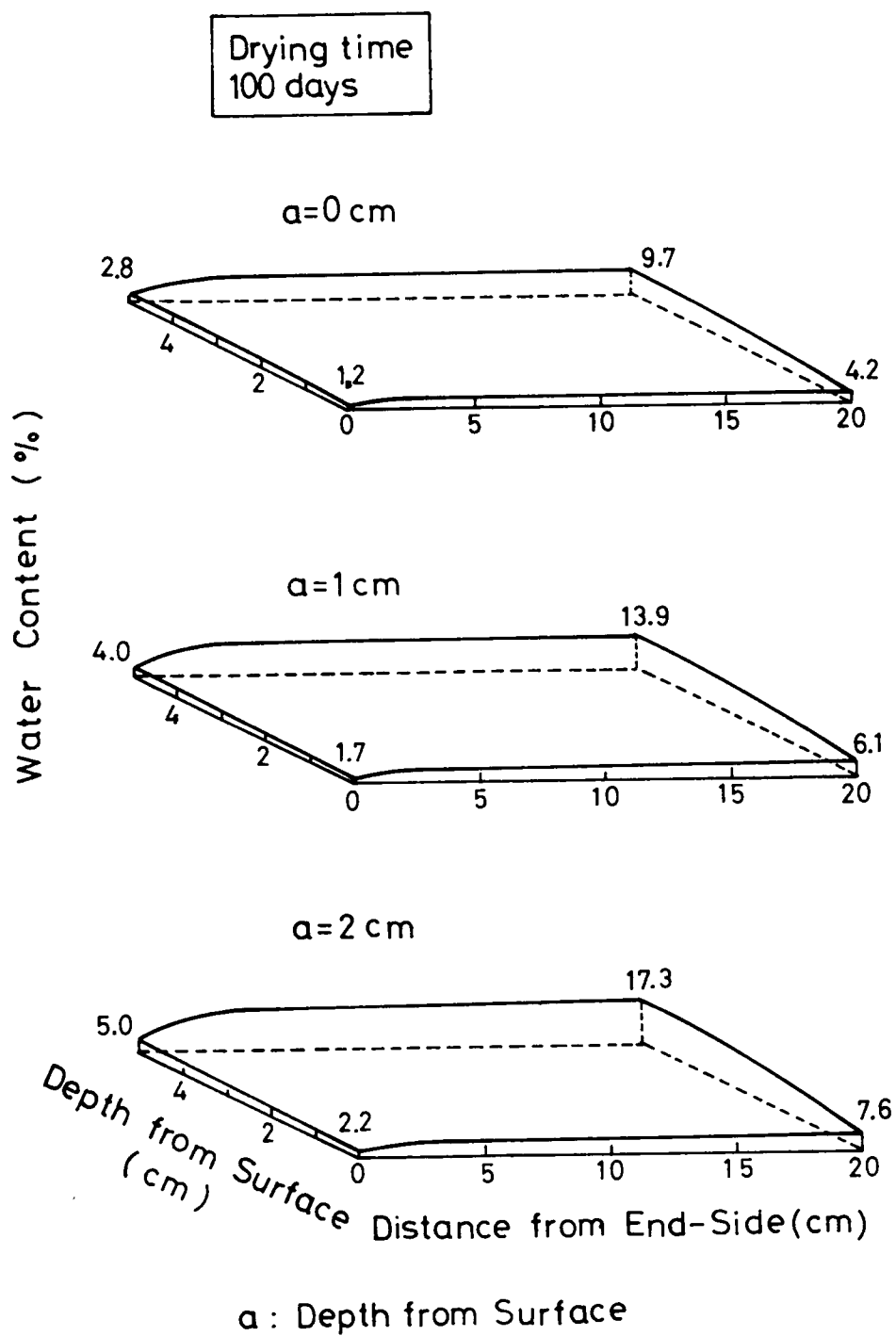
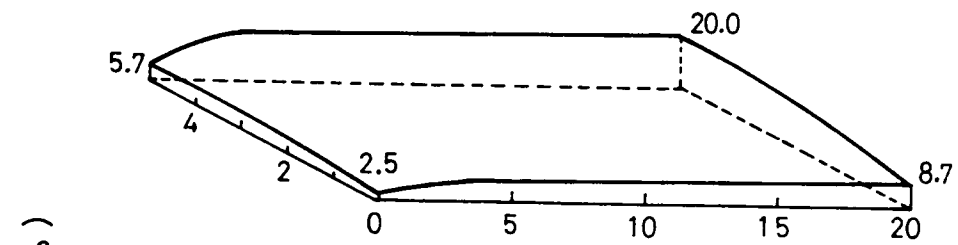


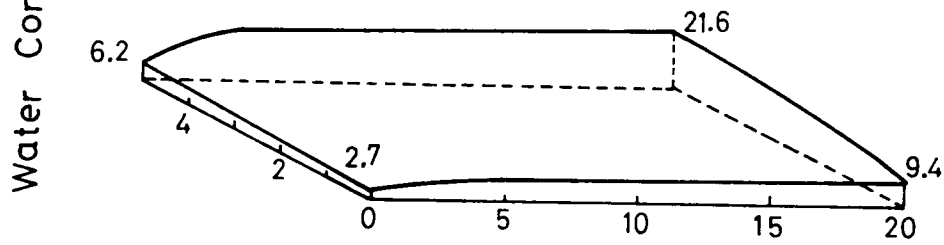
図-3・28 コンクリート中の水分の分布
(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)

Drying time
100 days

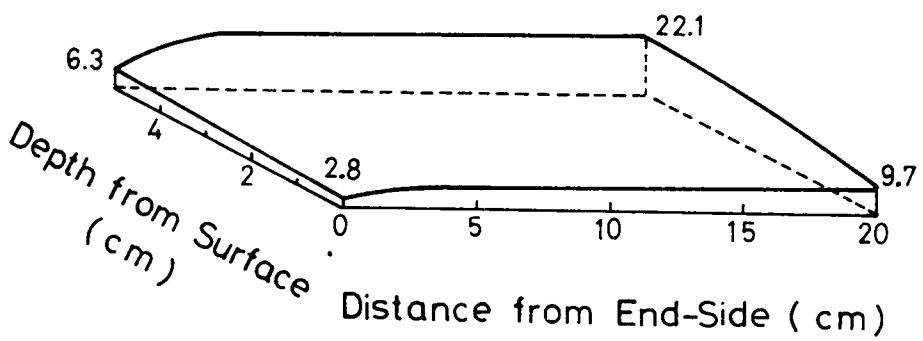
$a = 3 \text{ cm}$



$a = 4 \text{ cm}$



$a = 5 \text{ cm}$



a : Depth from Surface

図-3・29 コンクリート中の水分の分布
(Normal Concrete, R.H. 50%, Unsealed specimen)

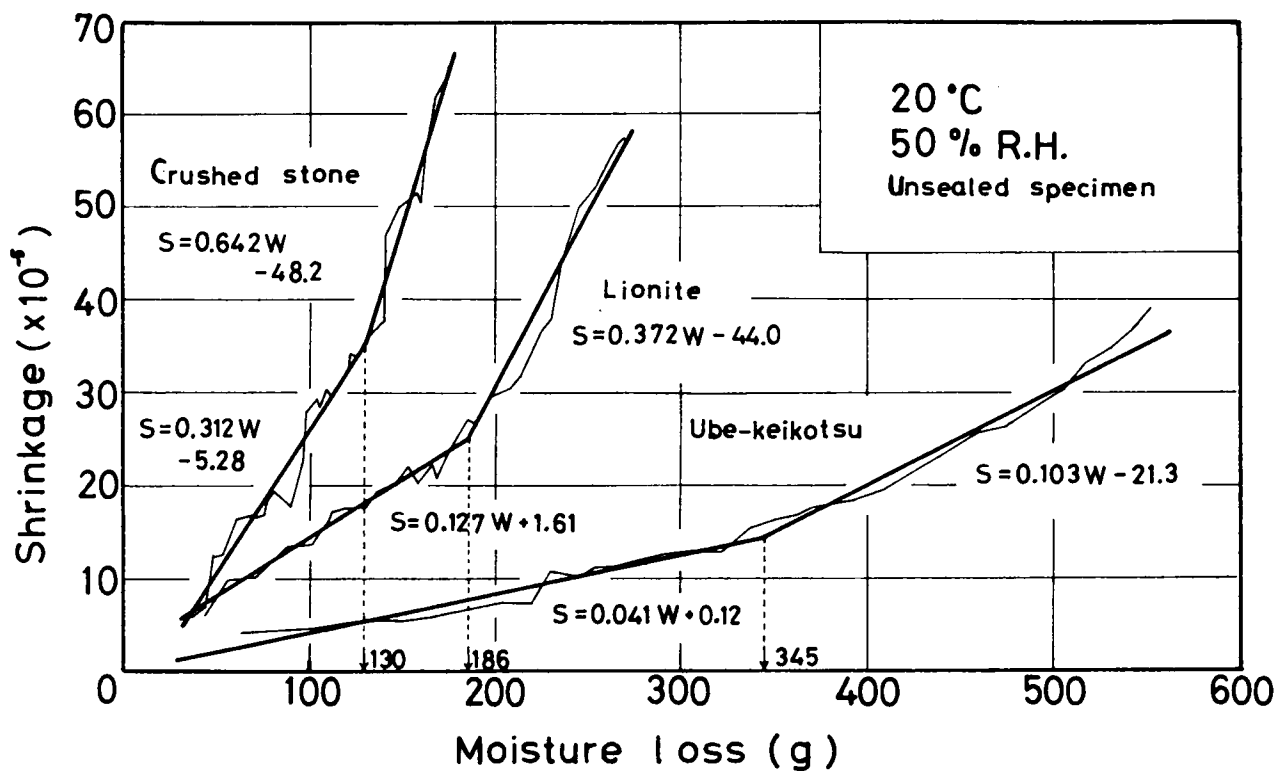


図-3・30 乾燥収縮と逸散水量との関係

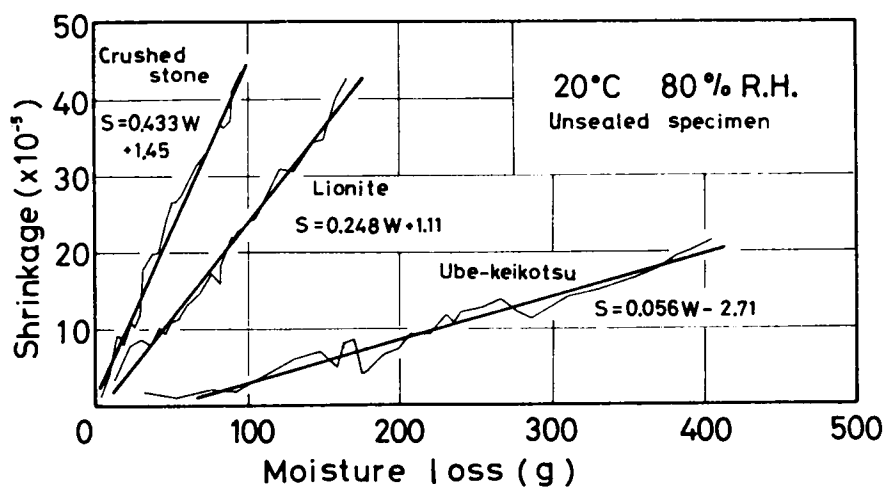


図-3・31 乾燥収縮と逸散水量との関係

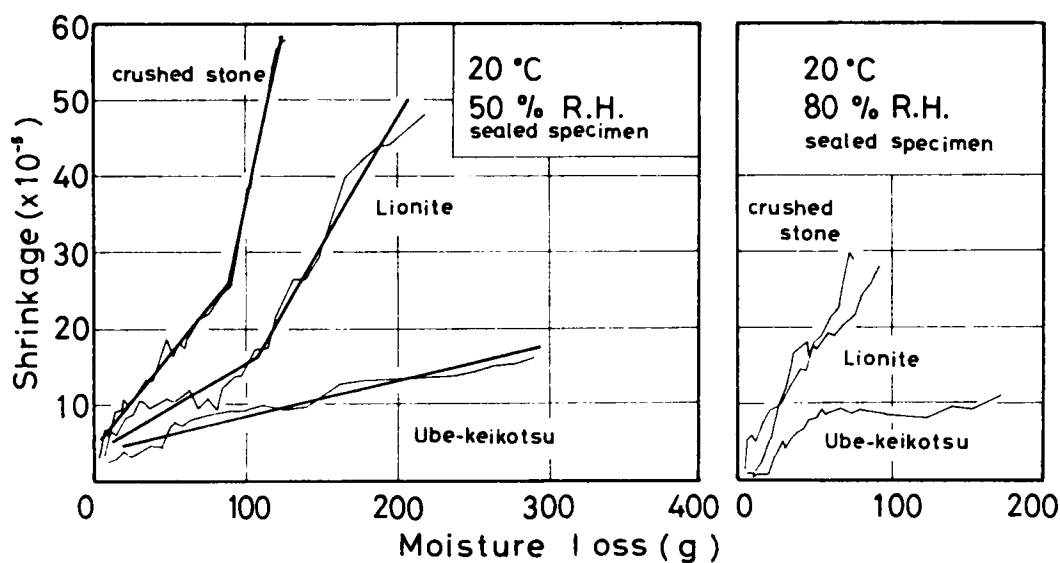


図-3・32 乾燥収縮と逸散水量との関係

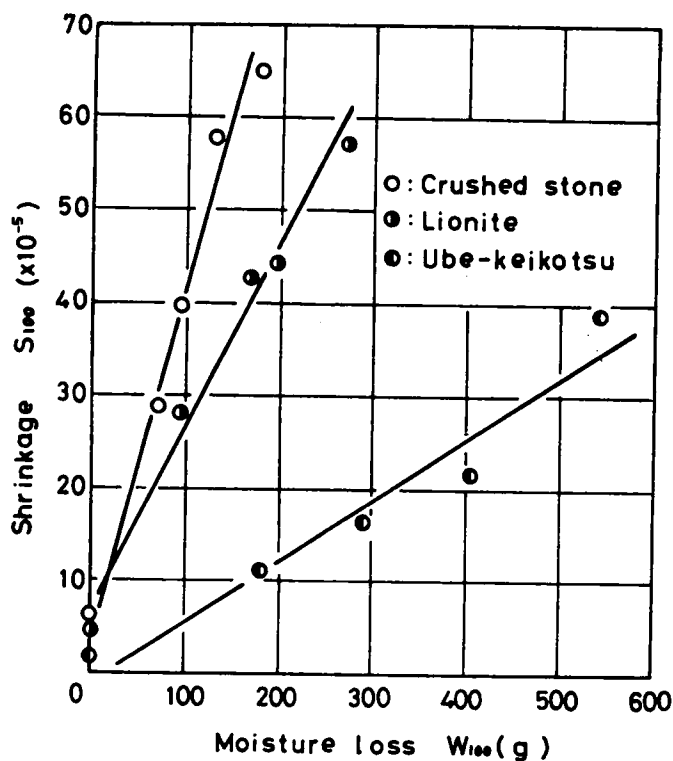


図-3・33 乾燥収縮と逸散水量との関係

第4章 コンクリートのクリープの生成機構に関する研究

4.1 概説と研究目的

一定持続荷重下におけるコンクリートの時間的塑性変形をクリープといい、前章で述べた乾燥収縮と同様、コンクリートが有する重要な変形挙動の一つである。実際のコンクリート構造物の設計においてクリープを考慮することは難しく、鉄筋コンクリート構造の設計においては、クリープの影響についてはほとんど考慮されていない。しかし、プレストレストコンクリートにおいては、クリープや乾燥収縮により導入応力の減退が起り、クリープの影響は看過できない問題である。

最近の社会的な要請に応え、多種多様なコンクリート構造物が設計、施工されつつあるが、そのような構造物の力学的挙動に多大の影響をおよぼすと考えられるクリープの問題をより正しく把握することの重要性があらためて認識されつつあるように思われる。

コンクリートのクリープにおよぼす影響については、すでに2.1で述べたように、従来の研究においてもかなり詳細に論じられている。しかしながら、コンクリートのクリープをより正しく理解するためには、その生成機構の面からも検討を加えることがきわめて重要な研究課題であると思われる。

コンクリートのクリープの生成機構については、従来より多くの説が提唱されてきたが、次節¹⁾でも詳しく述べるように、単独の説でクリープを完全に説明できるものは、今のところ見当らないようである。これは、コンクリートがセメント、水、骨材などからなる複合材料であること、セメントの水和反応がかなり長期にわたること、セメントの化学的組成が完全に解明されていないことなどに起因すると考えられる。従って、コンクリートの複合材料特性やセメント水和生成物の化学的組成が解明されていくにつれて、各説の修正ないしは新たな説の展開がしだいになされていくものと考えられる。

また、前述のごとく、Neville²⁾やBažant³⁾らによって、コンクリートのクリープの生成機構を熱力学という従来とはまったく違った見地から検討しようとする試みがなされつつあるが、現在のところでは、まだ完全には問題の解決にはいたっていない。

このような現状においてコンクリートのクリープの生成機構を考察する場合には、現在までに提唱されてきたコンクリートのクリープに関する諸説を十分に吟味し、いかなる要因がクリープの生成機構に対して支配的であるかということ、定量的に検討することも一方法であると考えられる。

前章でも明らかなように、コンクリートのクリープや乾燥収縮を論じる場合には、コンクリート中の水分の挙動が重要な要因の一つに考えられている。^{4),5)}

本研究においては、このようなコンクリート中の水分の持続荷重下における挙動に着目し、天然骨材および吸水量の異なる2種類の人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮クリープ試験を実施し、クリープひずみと逸散水量との関係、クリープひずみにおよぼす環境の湿度条件の影響および骨材の吸水量のクリープひずみや逸散水量に対する影響等について検討するとともに、これらの結果をもとにしてクリープの生成機構についても若干の考察を行なう。なお、本章では静的破壊強度の30%程度の持続荷重下におけるクリープ現象を対象にしており、高応力下のクリープ現象については第5章で論じる。

4.2 コンクリートのクリープの生成機構に関する諸説の検討^{1),4),6),7)}

コンクリートのクリープの生成機構について現在までに提唱されてきた諸説を分類するとつぎのとおりである。

- (1) シーページ、ゲル説 (Seepage or gel theory)
- (2) 遅延弾性説 (Delayed elasticity)
- (3) クラックの発生に起因する変形説 (Cracking deformation theory)
- (4) 結晶のすべり、塑性変形説 (Plastic theory)
- (5) 粘性流動説 (Viscous theory)
- (6) 最大安定への傾向、力学的変形説 (Mechanical deformation theory)
- (7) 不均一な乾燥収縮 (Non-uniform shrinkage)

つぎにこれらのあらましについて簡単に述べる。

(1) シーページ、ゲル説

セメントに水を加えると水和反応をおこし、セメントペースト内に結晶粒子を形成する。この水和反応は徐々に進行するため、結晶粒子の形成も徐々に進行する。従って、若材令においてはセメントペーストの大部分がコロイド状をなし、材令が進むにつれてセメントゲルを形成していく。このセメントゲル中に存在するゲル水が、コンクリートに載荷された持続荷重によって圧出されたり、外気との湿度勾配によって蒸発したりすることにより、セメントゲルが収縮し体積変化をおこす。この体積変化をクリープあるいは乾燥収縮であるとするのがこのシーページ理論である。

このゲル水の外部への逸散の大きさは、コンクリート中を貫通している毛細管を水が流れ

る際の摩擦抵抗によってもかわる。もし他の条件が同一であるとするならば、全摩擦抵抗はコンクリート内部と外部との湿度勾配によって左右され、この勾配が大きいほど水は毛細管を流れやすくなる。また、外圧を加えればゲル水が圧出されるが、このときのゲル水が圧出される割合、すなわちクリープは外圧の大きさと毛細管の摩擦抵抗の関数になると考えられる。このことは、他の条件が同一のクリープ試験において、環境の湿度が低いほどそのクリープが⁸⁾大きくなることを説明するものである。

この理論によれば、コンクリートのクリープと乾燥収縮が同一の理論によって説明できる。前章においてコンクリートの乾燥収縮の生成機構について詳しく論じたが、コンクリートの時間的な塑性変形がコンクリート中の水分の外部への逸散に起因するものであるということが明らかになったことから考えても、この理論がコンクリートのこの種の変形の原因を適切に説明し得るものであることがうかがわれる。

シーページ理論で説明できない現象として、Neville¹⁾はつぎのような点を挙げている。すなわち、空気中で乾燥されたコンクリートを水中において持続荷重をかけて測定したクリープひずみが、最初から水中に保存し、水中で持続荷重をかけて測定したクリープひずみの2倍になること、水中で引張クリープ試験を行なえば、同じ水中における圧縮クリープよりもその単位応力当りのクリープひずみは大きくなるはずであるが実際にはほとんど差がないこと、さらには持続荷重を載荷したコンクリートと載荷しない同一のコンクリートの逸散水量を比較すると、前者の方が多いはずであるが、実際には差がないことなどを報告している。これらの問題に関する実験データを検討していないのでその詳細はわからないが、後述する著者の実験においては、持続荷重を載荷した供試体の逸散水量の方が持続荷重を載荷しない供試体のそれよりも多く、Nevilleの反論とは違った結果になっている。

いずれにしろ、シーページ理論のみでは完全にクリープ現象のすべてを説明できないにしても、本研究のような圧縮クリープの生成機構を説明する場合には有効な理論であると思われる。

(2) 遅延弾性説

これはコンクリートのクリープを遅延弾性現象で説明しようとするものである。まず、コンクリートをバネとダッシュポットを並列に配列したケルビン要素で置き代えたもの、すなわち、固体の弾性的な骨組構造とその空けきを粘性流体で満たした物体であると考え。このような物体に持続荷重が載荷されると、粘性流体はその荷重を吸収し、それを徐々に固体の弾性的な骨組構造へと移行させる。このようにして骨組構造の弾性応答が遅らされ、その

遅れがクリープひずみとして現われるとするのである。この場合、骨材とゲル粒子が固体の骨組に相当し、ゲル水あるいはキャピラリー水が粘性相になる。

なおこの理論によれば、持続荷重が除荷されるとクリープひずみは完全に回復するはずであるが、実際にはそうでない。すなわち荷重を除荷しても回復しない永久変形が残るため、この説によってもコンクリートのクリープを完全に説明するためには不十分である。

(3) クラックの発生に起因する変形説

持続荷重下においては、硬化したセメントペースト中の粒子内、粒子間あるいはセメントペーストと骨材間の付着の局所的な破壊がおこると考えられる。この現象が時間的にずれをもった非回復変形（非回復クリープ）であるとするのがこの説である。これは、コンクリートの応力-ひずみ曲線が線形でないことから想像し得る。すなわち、低応力下においてもすでに局所的なマイクロクラックが発生しており、それに起因する変形がクリープひずみに含まれるとするものである。もちろん、この理論だけでクリープを説明できないことは回復クリープが存在することからも明らかであるが、クリープひずみの中にこの種のひずみが含まれていることは十分に想像し得ることである。

(4) 結晶のすべり，塑性変形説

金属材料のクリープが結晶格子内の欠陥部から生じる結晶格子のすべり変形によって説明されることにヒントを得て、セメントペースト内のゲル粒子相互間、あるいは骨材とセメントペースト間のすべりによりクリープがおこるとするのがこの説で、現象的には(3)のクラック説と類似の説である。しかしながら、金属の塑性変形では変形中にたえず新しい付着力が再生成されるが、コンクリートではそのようなことはなく、その塑性変形は根本的に異なる。従って、このような現象をコンクリートのクリープの原因と考えることは妥当でないと思われる。また、金属材料のこの種の塑性変形は、降伏点以下の低応力状態ではおこり得ないが、コンクリートのクリープは常時荷重作用状態のような低応力状態においてもおこることから、この説がコンクリートのクリープを正しく説明するものではないことがわかる。

(5) 粘性流動説

コンクリートのクリープをセメントゲルの粘性流動としてとらえるのがこの粘性流動説である。セメントペーストと骨材からなるコンクリートに持続荷重が載荷されると、荷重はまずセメントペーストに負担され、ペースト中のセメントゲルは粘性流動をおこす。時間の経

過とともに、粘性流動は骨材の存在によって阻止されるようになり、載荷重の一部が骨材に移行する。このように、時間の経過とともに載荷重のうち骨材が負担する部分が大きくなるため、ひずみ速度が徐々に小さくなり、ついには定常状態に達する。以上のように説明される粘性流動説は、巨視的に見れば(2)の遅延弾性説で述べたケルビン要素で表わされる現象と同一であると考えられる。

この粘性流動は体積変化を伴わないが、実際のクリープ試験では一軸圧縮の場合そのクリープ変形に関するポアソン比は0.5以下であり、体積の減少がみとめられる。これはコンクリートのクリープ現象が粘性流動のみによって説明されるのではなく、シーページ理論などにもよって説明される部分があることを示唆するものである。

(6) 最大安定への傾向、力学的変形説

この説はつぎのように説明される。持続圧縮荷重によってコンクリート中の毛細管が変形させられ、その結果キャピラリー水のメニスカスの向きが変化し、毛細管張力が弱められる。この弱められた引張力と平衡を保つため、固体相の圧縮応力が弱められる。つぎにキャピラリー水が外部へ蒸発することにより再び毛細管張力が増し、それに伴って固体相の圧縮応力が増す。この圧縮応力によってひきおこされる変形がクリープであるとするものである。

この説は前述のシーページ理論と遅延弾性説とに類似した理論であるが、荷重を除荷した場合には毛細管が元の状態に回復し、クリープは完全に回復するものであると仮定されている。この理論は現在ではほとんど受け入れられることはなくなっている。またこの理論は後になって修正され、コンクリートに持続荷重が載荷されることにより、不安定になった組織が安定な方向へと移りかわっていくための変形がクリープであるとされたが、その意味する内容は著しく不明確である。

(7) 不均一な乾燥収縮

コンクリートが乾燥される場合、不均一な乾燥収縮により内部応力が発生する。このような内部応力が持続応力に加算されコンクリートのひずみは大きくなる。すなわち測定されたクリープひずみの中にはこのような不均一な乾燥収縮に起因するひずみも含まれているとするのがこの説である。

以上に現在までに提唱されているコンクリートのクリープに関する諸説のあらましを述べたが、そのいずれの説も長所および欠点を有している。それは、前述のように、コンクリートそ

ものの性質とその硬化過程が複雑で十分に解明されていないためばかりでなく、クリープという言葉で総称される現象が非常に多岐にわたることにもよるものであると思われる。たとえば、圧縮、引張り、曲げおよびねじり荷重を受けるコンクリートの時間的な塑性変形をすべてクリープと定義しているが、荷重の形式が違えばその変形の様相も異なったものになるし、それらの現象すべてを一つの理論で説明しようとすることは、根本的に無理なことであろう。従って、各実験条件によって適用できる理論を見出すことが必要であると思われる。

本研究においては圧縮荷重下におけるクリープのみを扱っているので、その範囲において観察されるクリープ現象を、上述の諸説のいくつかを組合せて説明すべきであると考ええる。この問題については、4，7において検討する。

4.3 実験計画および実験方法

(1) 使用材料と供試体

本実験に使用した骨材は、天然骨材（砕石および川砂、記号：N）、造粒型人工軽量骨材ライオナイト（大阪社製、記号：L）および非造粒型人工軽量骨材宇部軽骨（宇部社製、記号：U）の3種類で、その物理的性質を表-4・1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント（大阪社製）を用いた。その物理的性質を表-4・2に示す。表-4・3に示したコンクリートの配合は、目標強度を定めず、セメント、水および骨材の容積率がコンクリートの種類にかかわらず一定となるように決定した。持続応力を導入し、クリープひずみおよび逸散水量を測定する供試体（クリープ供試体と略称）は、 $10 \times 10 \times 38$ cmの角柱供試体を2本直列に並べ、供試体間および両端に鉄製プレート（PL- $100 \times 100 \times 10$ mm）を挿入し、供試体断面の中心に $\phi 14$ mmの第4種PC鋼棒（高周波熱錬社製）を通したものである（図-4・1参照）。PC鋼棒の機械的性質を表-4・4に示す。

乾燥収縮および逸散水量測定用の無載荷の供試体（収縮供試体と略称）は、 10×10 cmの断面を有し、長さが30，40，50および60 cmの角柱である（図-4・1参照）。

コンクリートの練混ぜは、4切可傾式ミキサを用いて行ない、練混ぜ時間は全材料投入後3分間とした。コンクリートの締固めは棒突き法によった。供試体は打設後24時間実験室中（室温）に放置した後脱型し、脱型後は材令27日目まで標準水中養生を施した。

(2) 実験条件と実験方法

表-4・5に本実験の諸条件を示す。水中養生を施した供試体は材令27日目に水中よりとり出し、約15時間、温度 20°C 、湿度80%の恒温恒湿室内に置き、供試体表面が乾燥した直後にひずみ測定用のゲージプラグを相対する2面にそれぞれ2組ずつ、クリープ供試体では合

計 8 組，収縮供試体では合計 4 組貼付けた（図－4・1 参照）。

持続応力の導入は，材令 28 日目に油圧式ジャッキ（センターホールタイプ）を用いて行なった。すなわち，供試体断面中央に通した PC 鋼棒をジャッキで引張り，その反力としての圧縮力を鉄製プレートを介して供試体に載荷し，端部をナットで固定した。応力の導入に先立ち，クリープ供試体と同一条件のもとで打設養生した $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用いて圧縮強度および静弾性係数（ $1/3$ 割線弾性係数）を測定し，これらの値をもとにして導入応力の大きさを決定し，さらにクリープ試験体の弾性ひずみを測定して所定の応力が導入されているかどうかを検討した。なお導入応力の大きさは，静的強度の約 30% とした。クリープの進行に伴う導入応力の減退を防ぐため応力導入後 3 日目，1 週目，2 週目，以後 2 週目ごとに応力の再導入を行なった。

クリープひずみの測定は材令 28 日目より開始して応力導入後 120 日間行ない，そこでいったん除荷し，その後約 30 日間の回復クリープを測定した。クリープひずみの測定と同時に，クリープ供試体の逸散水量ならびに収縮供試体の乾燥収縮ひずみおよび逸散水量を測定した。ひずみの測定にはフーゲルベルガー型ひずみ計（検長 10 in）を，逸散水量の測定には卓上台秤（秤量；20 kg，感量；2 g）を用いた。なお水中に保存した供試体（すなわち湿度条件が 100% R.H. のもの）は，水分の逸散がないものと仮定して逸散水量の測定は行っていない。

4.4 実験結果

(1) 乾燥収縮試験結果

クリープ試験の結果を述べる前に，並行して行なった乾燥収縮試験の結果について簡単に述べる。乾燥収縮についての詳しい考察は前章で行なっており，本実験の結果もそれと大差はないので，ここでは結果の概略についてのみ報告するにとどめる。

表－4・6 に 100 日目の乾燥収縮ひずみと逸散水量を一括して示す。また，図－4・2～4・7 および図－4・8～4・10 に，それぞれ，環境湿度 50%，80% における乾燥収縮ひずみ－時間曲線および逸散水量－時間曲線を示す。

表－4・6 および図－4・2～4・7 によれば，乾燥収縮ひずみの値は供試体の長さ（ ℓ ）にかかわらず，いずれのコンクリートにおいても湿度条件が同一であればほぼ同程度の値になる。ただライオナイトコンクリートの $\ell=50, 60$ cm の場合の乾燥収縮ひずみが， $\ell=30, 40$ cm の場合のそれよりも小さい。また図－4・8～4・10 によれば，逸散水量は他の条件が同じ場合には供試体寸法が長いほど多くなっている。ただここにおいてもライオナイトコンクリートの $\ell=50, 60$ cm の場合の逸散水量が $\ell=40$ cm の場合のそれよりも少ない。

これは試験前に供試体を水中よりとり出して乾燥させる際に， $\ell=50, 60$ cm のライオナ

イトコンクリートの供試体を他の供試体より乾燥させすぎたためコンクリート中の水分が少なくなった結果、逸散水量および乾燥収縮ひずみが小さくなったのではないと思われる。いずれにしろ、他のコンクリートの結果から予想されるものとは違った結果になっており、実験上のミスと考えざるを得ない。

図-4・11に100日目の乾燥収縮と環境の湿度との関係を、図-4・12～4・14に各供試体の乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係を示した。いずれの場合も第3章の結果と同様であり、供試体の長さが違ってほぼ同様の傾向を示している。

(2) クリープ試験結果

クリープ試験結果を表-4・7および図-4・15、4・16に示す。表-4・7中のA、Bは、クリープ時間曲線に関するRossの式

$$f_c = \frac{t}{A + B t} \quad \text{-----} \quad (4 \cdot 1)$$

における実験定数である。また、(4.1)式において $t \rightarrow \infty$ とすれば、

$$f_n = 1/B \quad \text{-----} \quad (4 \cdot 2)$$

となり、 f_n は実験式より推定される終局クリープひずみとなる。表-4・7の n はクリープひずみが終局クリープひずみの $1/2$ になるのに要する日数を表わす。

図-4・15はクリープひずみ(f_c)と時間(t)との関係を、図-4・16は単位応力当りのクリープひずみ(f_c/σ)と時間(t)との関係を示したものである。

一般に、軽量コンクリートのクリープは普通コンクリートのそれよりも大きいといわれている。⁹⁾本実験の結果では、図-4・15より明らかなように、環境が高湿度(R・H・80%、100%)の場合にはコンクリートの種類による差はあまり大きくないが、低湿度(R・H・50%)の場合にはコンクリート中の骨材の吸水量が大きくなるにしたがってクリープひずみが小さくなる傾向が見られた。

図-4・16に示した単位応力当りのクリープで比較すると、環境湿度が50%の場合、ライオナイトコンクリートのクリープは普通コンクリートのそれよりも大きい、宇部軽骨コンクリートのクリープは普通コンクリートのそれよりも小さい。しかし湿度80%の場合には、軽量コンクリートのクリープは普通コンクリートのそれよりも大きい。また、 n の値はいずれの条件においても軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりも大きい。すなわち、吸水量の大きい骨材を用いたコンクリートにおいては、骨材中に多量の水を有しているため、持続応力の導入によってセメントゲル中の水分が外部に逸散しても(シーページ現象がおこったとし

ても) 骨材中の水によって補われ、クリープひずみの増加の割合が小さく、一定値に収れんするものも遅くなると推察される。

以上の事実より、コンクリートの生成機構を論じる場合、コンクリートの有する水分の量とその外部への逸散が重要な要因であることがうかがわれる。

なお、軽量コンクリートの終局クリープ係数(φ_n)は、普通コンクリートのその50～70%程度である。

4.5 環境の湿度がクリープにおよぼす影響

図-4・17に、測定開始後100日目における単位応力当りのクリープひずみと環境の湿度との関係を示す。図-4・17より、環境の湿度が高くなるとクリープひずみは小さくなり、両者の間にはほぼ指数関数的な関係がみとめられる。また、吸水量の多い骨材を用いた宇部軽骨コンクリートは湿度変化によるクリープひずみの相違が他のコンクリートよりも小さい。これは前節でも述べたように、コンクリートのクリープがコンクリート中の水分の量とその時間的な挙動によって支配されること、すなわちコンクリートのクリープがシーページ理論によって説明し得る可能性を示唆しているものと考えられる。

しかしクリープひずみがシーページ現象のみに起因するものであると仮定するならば、環境の湿度が100%の場合のクリープひずみは、図-4・11に示した乾燥収縮ひずみの場合と同様、0または0に近い値となるはずである。しかし図-4・17から明らかのように、実際には湿度100%の環境においてもかなりのクリープひずみが現われている。これはコンクリートのクリープひずみがシーページ現象のみに起因するものではなく、他の原因によるひずみも含んでいることを示すものである。

表-4・8に持続応力除荷時におけるクリープひずみ(f_c)とその後の回復クリープひずみ(f_r)およびそれらの比(f_r/f_c)の値を示したものである。表-4・8によれば、回復クリープは環境の湿度が高くなるにつれて小さくなる傾向が見られる。一般に、 f_r/f_c の値は¹⁰⁾環境の湿度が高くなれば大きくなるといわれているが、本実験においてはそのような傾向は普通コンクリートのみにみとめられ、軽量コンクリートにおいては顕著でない。また、低湿度においては軽量コンクリートの f_r/f_c の値は普通コンクリートのその2～3倍になっているが、高湿度(R.H.100%)においてはほとんど差はみとめられない。

以上に述べたように、コンクリートのクリープひずみは持続応力を除荷するとある程度は回復する。従って、クラックの発生に起因する変形説や塑性変形説¹⁰⁾だけではクリープの内部機構は説明できないことを示している。しかし、遅延弾性説や粘性流動説で説明されるように、すべてのクリープひずみが回復

するわけでもない。すなわち、コンクリートのクリープひずみの中には、前節で述べたシーページ効果によるひずみ以外にも、遅延弾性説等によって説明される回復性ひずみや、クラックの発生
の起因する変形説によって説明される非回復性ひずみが含まれていると推察される。

4.6 コンクリート中の水分の逸散とクリープひずみとの関係

コンクリートのクリープの生成機構を考える場合、コンクリート中の水分とその挙動が重要な
要因になることはすでに述べたが、ここではクリープ試験におけるコンクリート中の水分逸散の
状況を検討するとともに、逸散水量とクリープひずみとの関係について考察する。

図-4・18にクリープ供試体の逸散水量と時間との関係を示す。一般に、持続荷重を載荷し
たコンクリートのひずみは、乾燥収縮ひずみとクリープひずみとに分けられる。従って、クリー
プ供試体の逸散水量（これを $W_c + s$ で表わす）は、乾燥収縮をおこさせるのに相当するもの
（ W_s と略記）とクリープひずみをおこさせるのに相当するもの（ W_c と略記）とに分けられる。
この W_c を求めるためには、全逸散水量（ $W_c + s$ ）より W_s を差し引いてやる必要がある。
そのためには、まずクリープ供試体の W_s を推定しなければならない。

逸散水量はひずみとは異なり、供試体の寸法や表面積によって異なることが予想されるため、
クリープ供試体の逸散水量よりコントロール供試体（本実験の場合は $10 \times 10 \times 40$ cmの収縮
供試体）の逸散水量を差し引くだけでは W_c は求まらない。本実験で用いたクリープ用供試体は、
図-4・1に示すように、コントロール用供試体とは寸法も若干異なり、さらに断面中央に鋼棒
を挿入するための穴をもうけているためその体積も異なり、何らかの補正をする必要がある。

他の条件が同一で供試体寸法が異なる場合の逸散水量は、供試体の体積と表面積との関数にな
ると想像される。このような変数としてここでは換算表面積（ S^* ）を考えた。なお、換算表面
積とは角柱供試体の体積と同一の体積を有する立方体の表面積と定義する。

図-4・19にクリープ試験と並行して行なった乾燥収縮試験の結果より、寸法の異なる4種
類（ $\ell = 30, 40, 50, 60$ cm）の収縮供試体の、測定開始後45日および100日におけ
る逸散水量と S^* との関係を示す。なお、ライオナイトコンクリートについては、 $\ell = 50$ およ
び60 cmの供試体の結果については除外して、 $\ell = 30$ および40 cmの供試体の結果のみを図示
した。

図-4・19によれば、逸散水量と S^* の間には明確な直線関係がみとめられる。従って図
-4・19において、クリープ供試体の S^* に対する W_s を直線上に求めると、これがクリープ
供試体の乾燥収縮ひずみをおこさせるのに要した逸散水量になる。これを $W_c + s$ から差し引く
と測定開始後45および100日目における W_c が求められる。

11)
なお、Campbell¹¹⁾らによれば、供試体の形状、寸法と乾燥収縮との関係は、供試体の体積と表面積のみによって関連づけることはできないと報告している。しかし、ここではごく限られた範囲の寸法および形状を問題にしているので、図-4・19で求められた直線関係より、クリープ供試体の W_s を求めることにした。

このような手法により、2, 5, 8, 10, 20, 30, 45, 60, 80および100日目における W_c を求め、それと時間との関係を示したのが図-4・20である。

図-4・20によれば、 W_c は、図-4・8～4・10に示した W_s の場合と同様、コンクリート中の骨材の吸水量が大きいものほど多くなっている。

いま、図-4・20より求められる100日目における W_c 、クリープ供試体から逸散し得る水量(配合において、骨材中に吸水されている水量を含む全水量よりセメントの水和に必要な水量、すなわち W/C に換算して23%¹²⁾の水量を差し引いた水量; W)およびそれらの比を表-4・9に示す。表-4・9によれば、軽量コンクリートの W_c/W のほうが普通コンクリートのそれよりも大きい。

図-4・21はクリープひずみと逸散水量の関係を示したものである。一般に、逸散水量が多くなるにつれてクリープひずみも大きくなる。また、骨材の吸水量の小さいものほど逸散水量のクリープにおよぼす影響は大きくなる。すなわち、普通コンクリートにおいては両者の関係は直線に近く、また逸散水量に対するひずみの割合は大きい。軽量コンクリートにおいては両者の関係は指数関数的であり、逸散水量に対するひずみの割合は小さい。その傾向は宇部軽骨コンクリートにおいて著しい。

つぎにこれらの結果を総合して、コンクリートのクリープに伴う水分逸散の機構を考えてみる。

吸水量の大きい骨材を用いたコンクリートにおいては、最初のうちは逸散水量が多いにもかかわらずクリープひずみはそれほど増大しないが、時間が経過するにつれて逸散水量に対するクリープひずみの割合が大きくなる。これは、最初の段階においては持続荷重によってセメントゲル中の水分が圧出されても骨材中の水によって補われるため、クリープひずみはそれほど増大しないが、このような過程を繰返しているうちに、骨材中の水分が少なくなり、その結果逸散水量に対するクリープひずみの割合が徐々に大きくなることを示していると考えられる。しかし逸散水量に対するクリープひずみの割合は、普通コンクリートの場合のそれよりも小さく、水分逸散に起因するクリープひずみは普通コンクリートよりも少ないことが予想される。

一方、吸水量の小さい骨材を用いた普通コンクリートでは水分の逸散量にほぼ比例してクリープひずみが増大し、また逸散水量に対するクリープひずみの割合は軽量コンクリートの場合より

もはるかに多い。したがって乾燥状態にある普通コンクリートでは、水分の逸散に起因するクリープひずみの割合が大きくなることが予想される。

4.7 コンクリートのクリープの生成機構に関する一考察

従来より提唱されてきたコンクリートのクリープの生成機構に関する諸説の検討および前節までにおいて述べた本実験の結果に対する考察を総合すると、コンクリートの圧縮クリープの生成機構は、つぎの三つの原因によるものであるとして説明することができると考えられる。

- (1) シーページ効果
- (2) 遅延弾性
- (3) マイクロクラックの発生に起因する変形

これらのうち遅延弾性およびマイクロクラックの発生に起因する変形によるクリープひずみは、それぞれ回復性および非回復性のひずみであるが、シーページ効果に起因するひずみは、その実験条件（湿度条件など）によって回復性ひずみが存在する場合もあるが、その大部分は非回復性のひずみであると考えられる。

実験で観察されたコンクリートの圧縮クリープの各ひずみ成分がこれらの三つの原因のうちのどれに起因するものであるかということについて若干の考察を行なう。

本実験の結果によれば、環境の湿度が低くなるにつれてそのクリープひずみは大きくなる傾向が観察された。一般に、コンクリートのクリープひずみはベーシッククリープ（Basic creep）とドライイングクリープ（Drying creep）とに大別され、ベーシッククリープとはコンクリートと外部との間に水分の移動がない場合のクリープひずみであり、ドライイングクリープとはコンクリートと外部との間に水分の移動がある場合にベーシッククリープに対し付加的にあらわれるクリープひずみであると定義されている¹³⁾。したがって、本実験における環境湿度100%の場合（水中）のクリープひずみはベーシッククリープのみであり、環境湿度80%および50%の場合のクリープひずみはベーシッククリープとドライイングクリープからなると考えられる。表-4・10に示した本実験の結果によれば、ベーシッククリープおよびドライイングクリープはいずれも回復性のクリープひずみと非回復性のクリープひずみからなっている。以上のことを模式的に示すと図-4・22のようになる。

このようにクリープひずみを分類することができるならば、図-4・22に示したように非回復性のベーシッククリープはマイクロクラックの発生に起因する変形によるクリープひずみであり、回復性のベーシッククリープは遅延弾性に起因するひずみとなり、さらにドライイングクリープはシーページ効果によるものであると考えることができる。そのためにはつぎの二点につき

検討しなければならない。

まず第一の問題は、環境湿度が80%および50%の場合のベーシッククリープを環境湿度100%の場合のベーシッククリープと同一としてよいかということである。

コンクリートの硬化および強度発現のもとになるセメントの水和反応はきわめて長時間を有するものであり、クリープ試験を実施している期間においてもまだ完全には水和反応は完了していない。またこの水和反応はコンクリートの養生方法(すなわち環境条件)によって著しく異なるものであり、同一のコンクリートであってもクリープ試験実施中の環境湿度の相違により、強度などのコンクリートの性質が異なったものになるおそれがある。このような場合にでもベーシッククリープを一定と考えてよいかということを実験の条件に合せて考えておかなければならない。

本実験においては、持続荷重載荷時の材令28日目までは、すべての供試体を水中養生しているため、クリープ試験開始時における同一種類のコンクリートの性質はまったく同一であると考えられる。また、材令28日における水和度は約87%⁷⁾程度であり、したがって材令28日以後の環境の湿度条件の相違による水和度および強度の相違はごくわずかであると想像される。たとえば、米国Bureau of Standardによる実験によれば、¹⁴⁾全期間湿気養生されたコンクリートと28日間湿気養生され以後大気中で養生された同一のコンクリートとの材令13週における強度の相違は、材令28日における強度の7%程度である。

コンクリートの強度が若干相違する場合、それがクリープに対してどの程度影響するかについても検討しなければならない。¹⁵⁾Kliegerは、コンクリート強度が140、280および420 kg/cm²のコンクリートに、それぞれの強度の30%の持続荷重を載荷した場合の終局クリープひずみを測定し、それぞれ 933×10^{-6} 、 1067×10^{-6} および 1100×10^{-6} になることを報告している。このように強度がかなり相違しても、そのクリープひずみにはそれほど顕著な差はみとめられない。Kliegerの実験においては各供試体によってセメント量や水セメント比も異なっているが、本実験の場合にはセメント量や水セメント比も変わらずまったく同一のコンクリートであるため、たとえクリープ試験中の湿度条件の相違によって強度が若干異なったとしても、それがクリープにおよぼす影響はごくわずかであるとみなしてよいと思われる。また、本実験においては、コンクリートの種類によりその材令28日における強度はかなり異なっている(普通コンクリート; 415 kg/cm², ライオナイトコンクリート; 243 kg/cm², 宇部軽骨コンクリート; 325 kg/cm²) が、表-4・10の実験結果によれば、環境湿度100%の場合のクリープひずみはコンクリートの種類によりそれほど顕著な差はみとめられず、回復性ひずみと非回復性ひずみの割合もほぼ同程度である。このことからベーシッククリープを形成する回復性

および非回復性のクリープひずみは湿度条件の影響は受けないものであると考えられる。

第二の問題点はドライイングクリープがシーページ効果によるものであり、上述の定義のようにベーシッククリープのなかにシーページ効果に起因するひずみが含まれていないかどうかということである。

Jorda¹⁶⁾anらは防水性の塗料で露出面を完全に被覆したコンクリートの一軸、二軸および三軸载荷のクリープ試験を行ない、いずれの場合もその体積ひずみがまったく一致すること、さらに一軸および二軸クリープ試験においては無载荷方向のひずみと载荷方向のひずみの比(クリープポアソン比)が静的载荷のそれと同一であることを報告している。またNeville²⁾らは湿度100%の場合のクリープ試験におけるクリープポアソン比は静的試験におけるそれに等しいが、乾燥状態のクリープ試験におけるクリープポアソン比は静的载荷の場合のそれよりもかなり小さくなり、そのクリープひずみも湿度100%の場合よりも大きくなると報告している。これらの実験結果よりベーシッククリープには、シーページ効果に起因するひずみは含まれていないと考えられる。

図-4・23は、本実験の結果より、環境湿度50%および80%の場合のクリープひずみより環境湿度100%の場合のクリープひずみを差し引いた値、すなわちドライイングクリープと逸散水量との関係を図示したものである。図-4・23によれば、環境の湿度が50%の場合のドライイングクリープと逸散水量の間には明確な直線関係がみとめられる。このことから、ドライイングクリープはコンクリート中の水分の外部への逸散、すなわちシーページ効果に起因するものであることがわかる。なお環境湿度が80%の場合はひずみ量も少なく、顕著な直線性はみとめられない。

以上述べたようにドライイングクリープがシーページ効果に起因するものであり、ベーシッククリープがシーページ効果以外の原因によるものであるならば、ベーシッククリープのうち回復性のクリープひずみは遅延弾性によるものであり、非回復性のひずみは持続荷重によってコンクリート中に発生した微小なクラックに起因する変形によるものであると考えられる。

一方、表-4・8に示した実験結果によれば、回復クリープは環境の湿度によって異なり、環境湿度50%および80%の場合の回復クリープから湿度100%の場合のそれ(回復性のベーシッククリープ)を差し引いたものがドライイングクリープの回復性ひずみである(表-4・10参照)。この回復性のドライイングクリープの量はコンクリートの種類によって異なり、普通コンクリートの場合はごくわずかであるが、軽量コンクリートの場合はかなりある。このような現象についてもシーページ理論によって説明できる。

持続荷重を除荷した場合、遅延弾性による回復クリープ以外にも、外部から水分の補給があればセメントゲルが膨潤し、シーページ効果による回復クリープがあらわれ⁷⁾る。本実験の場合には

持続荷重除荷後も環境の湿度条件は変わらないので、供試体外部からの水分の補給は考えられない。しかしセメントペースト中に残っている水分および骨材中にも自由に移動しうる遊離水が残っているため、多くの遊離水を有する軽量コンクリートでは、それだけ多くの水分をセメントゲルに補給することができ、回復性のドライイングクリープが普通コンクリートよりも大きくなったのではないと思われる。

本節においては、コンクリートの圧縮クリープを、その生成機構の面から検討したが、実験条件およびそれにともなうひずみの種類によりその生成機構は異なり、単独の説でコンクリートのクリープのすべてを説明することはできない。したがって、それぞれの実験条件に応じたクリープ生成機構を考えることが必要であると思われる。

4.8 結 論

本章においてはコンクリートのクリープの内部機構に影響をおよぼすと考えられる要因のうち、とくにコンクリート中の水分の挙動に着目し、時間の経過に伴うコンクリート中の水分の外部への逸散がコンクリートのクリープにいかなる影響をおよぼすかということを中心に検討し、併せて使用骨材の種類（コンクリートの種類）および環境の湿度条件の影響についても検討を加えた。さらにコンクリートのクリープの生成機構に関する諸説を検討し、本実験の結果をもとにそれらの諸説のうちいかなる説がコンクリートのクリープを説明するのに有効であるかにつき若干の考察を行なった。

コンクリートのクリープに影響する要因はきわめて多く、クリープ現象そのものも実験条件によってかなり違った様相を呈するものであるので、そのすべてについて明らかにすることはもとより困難な問題である。本研究においては比較的短期間の圧縮クリープについて検討したが、その結果明らかになったことを列挙して結論に代える。

- 1) コンクリートのクリープの環境湿度依存性はかなり強く、クリープひずみと環境湿度との間には指数関数的な関係がみとめられ、環境湿度が低くなればクリープひずみは大きくなる。またその傾向は使用した骨材の吸水量が小さいほど、すなわちコンクリート中の自由水が少ないほど顕著である。
- 2) 持続荷重が載荷されたコンクリートの全逸散水量は、使用骨材の吸水量が多いほど多くなる。さらに環境の湿度条件の影響が著しく、湿度が低いほど逸散水量は多くなる。
- 3) 乾燥収縮の原因となる水分の逸散のほかに、クリープの原因となると考えられる水分の逸散現象がみとめられ、その逸散水量はコンクリート中の自由水（すなわち骨材中の水）が多いほど大になる。

- 4) コンクリートのクリープ現象にともなう逸散水量の全逸散可能水量に占める割合は、軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりも大きい。
- 5) コンクリートの全クリープひずみは逸散水量が多くなるにしたがって増大し、両者の関係は直線ないし直線に近い曲線で表わされる。また使用骨材の吸水量の小さい普通コンクリートでは逸散水量の変化がクリープにおよぼす影響は大きく、両者の関係は直線的であるが、吸水量の多い字部軽骨コンクリートでは、水分の逸散にともなうクリープひずみの増加の割合は小さい。
- 6) コンクリートのクリープひずみは、ベーシッククリープとドライイングクリープとの二種類のクリープひずみに大別される。
- 7) ベーシッククリープは、コンクリートと外部との間に水分の移動がない場合のクリープひずみであり、環境の湿度条件およびコンクリートの種類にかかわらずほぼ一定とみなすことができ、遅延弾性による回復性のひずみとマイクロクラックの発生による非回復性のひずみとからなる。
- 8) 環境の湿度が低い場合には、ベーシッククリープのほかにドライイングクリープが現われるが、それはコンクリートの種類（使用骨材の吸水量）および環境の湿度条件によって異なる。とくに環境の湿度が低い場合には、ドライイングクリープと逸散水量とはほぼ比例関係にあり、ドライイングクリープがシーページ効果に起因するものであることがわかる。

〈 第 4 章 参 考 文 献 〉

- 1) A.M.Neville, "Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Res-tressed" North Holland Publishing Company, 1970
- 2) K.S.Gopalakrishnan, A.M.Neville and A.Ghali, "A Hypothesis on Mechanism of Creep of Concrete with reference to Multiaxial Compression" Journal of the ACI, January, 1970
- 3) Z.P.Bažant, "Thermodynamics of interacting continua with surfaces and creep analysis of concrete structure" Nuclear Engineering and Design, Vol.20, No.2, 1972
- 4) 岡田清, "コンクリートのクリープ" コンクリートパンフレット第29号, セメント技術協会
- 5) ACI, "Symposium on Creep of Concrete" Publication SP-9, Paper No.3, 1964
- 6) J.Glucklich and O.Ishai, "Rheological Behavior of Hardened Cement Paste under Low Stresses" Journal of the ACI, February, 1961
- 7) C.Kesler and I.Ali, "Mechanisms of creep in Concrete" Symposium on Creep of Concrete, Special Publication No.9 Paper No.2, 1964
- 8) 岡田, 小柳, 阪田, "クリープの環境湿度依存性" 土木学会コンクリートライブラリー第24号, 1969年6月
- 9) 西林, 千葉編著 "人工軽量骨材コンクリートー土木構造物への応用ー" 朝倉書店, 昭和44年8月
- 10) J.M.Illston, "The creep of concrete under uniaxial tension" Magazine of Concrete Research, Vol.17, No.51, June 1965
- 11) D.Campbell et al, "Shrinkage of Concrete as affected by size" Materials and Structure, 1975, May-July, PP.193~202
- 12) A.M.Neville, "Properties of Concrete" Sir Isaac Pitman & Sons Ltd.

- 13) 既出 1) PP.12~17
- 14) 近藤, 坂監修, "コンクリート工学ハンドブック" 朝倉書店 PP.292~293
- 15) A.M.Neville and B.L.Meyers, "Creep of Concrete: Influencing Factors and Prediction" ACI Special Publications SP-9 PP. 10~11
- 16) I.J.Jordaan and J.M.Illston, "The creep of sealed concrete under multiaxial compressive stress" Magazine of Concrete Research, Vol.21, No.69, December, 1969

表-4・1 使用骨材の物理的性質

Kind of Aggregate		Specific gravity	Water absorption (%)	Weight of unit vol. (kg/m^3)	F.M.
Coarse Agg.	Crushed stone(N)	270	1.21	1530	7.29
	Lionite (L)	1.34	230	800	6.65
	Ube-keikotsu (U)	1.57	130	843	6.51
Fine Agg.	River sand (N)	256	1.23	1420	2.98
	Lionite (L)	1.37	400	1100	2.62
	Ube-keikotsu (U)	1.90	11.5	1120	2.53

表-4・2 セメントの物理的性質

Specific gravity	Soundness	Flow	Fineness	Setting time(h-m)	
			Specific surface (m^2/g)	Initial	Final
315	good	252	3230	2-55	4-05
Bending strength (kg/cm^2)			Compressive strength (kg/cm^2)		
3days	7days	28days	3days	7days	28days
349	521	748	143	244	416

表-4・3 コンクリートの配合表

Specimen	W/C (%)	C (kg/m^3)	W (kg/m^3)	S/a (%)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)	Pozz. No. 8
N	45	360	162	45	823	1045	C× 0.25%
L	45	360	162	45	548	518	
U	45	360	162	45	601	606	

表-4・4 PC鋼棒の機械的性質

項 目	平 行 部					ね じ 部	
	引張荷重 (kg)	引張応力 (kg/mm^2)	降伏点荷重 (kg)	降伏点応力 (kg/mm^2)	伸率 (%)	引張荷重 (kg)	抗 張 力 (kg/mm^2)
規 格	—	125以上	—	110以上	5以上	—	125以上
∅ 14 mm	18100	1390	16800	1290	7.5	16900	1268

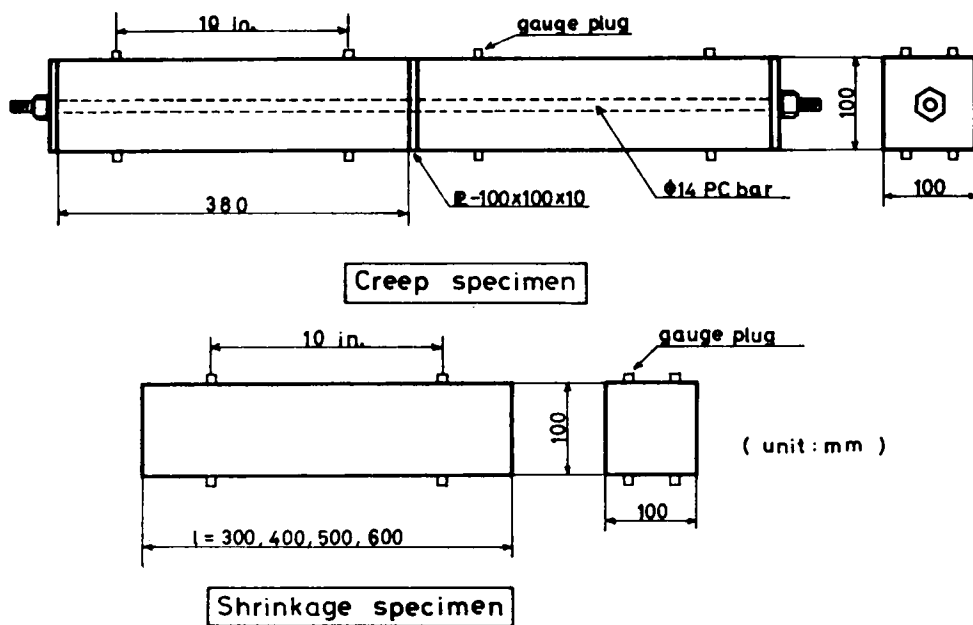


図 - 4 ・ 1 供試体の形状と寸法

表 - 4 ・ 5 実 験 条 件

Specimen	Temperature	Relative Humidity
N	20℃ ± 2 deg	50% R.H.
L		80% R.H.
U		100% R.H. (in water)

表-4・6 乾燥収縮および逸散水量試験結果

Specimen	Relative humidity (%)	l (cm)	Shrinkage strain		Moisture loss	
			S100	($\times 10^{-5}$)	W100	(%)
Crushed stone	50	30	53.75		160	
		40	50.00		193	
		50	50.00		216	
		60	51.25		262	
	80	30	20.25		45	
		40	22.25		66	
		50	20.75		57	
		60	20.00		72	
	100	30	-8.00		-	
		40	-8.00		-	
		50	-6.00		-	
		60	-7.00		-	
Lionite	50	30	52.00		252	
		40	53.00		337	
		50	40.25		262	
		60	42.75		299	
	80	30	17.50		108	
		40	20.00		155	
		50	14.25		103	
		60	16.25		124	
	100	30	-6.00		-	
		40	-5.00		-	
		50	-5.00		-	
		60	-5.00		-	
Ube-keikotsu	50	30	36.75		474	
		40	37.00		641	
		50	36.50		787	
		60	37.25		929	
	80	30	18.00		259	
		40	16.75		354	
		50	19.00		470	
		60	16.75		558	
	100	30	-3.00		-	
		40	-3.50		-	
		50	-1.00		-	
		60	-2.00		-	

(註) 乾燥収縮ひずみの負号は膨張を表わす。

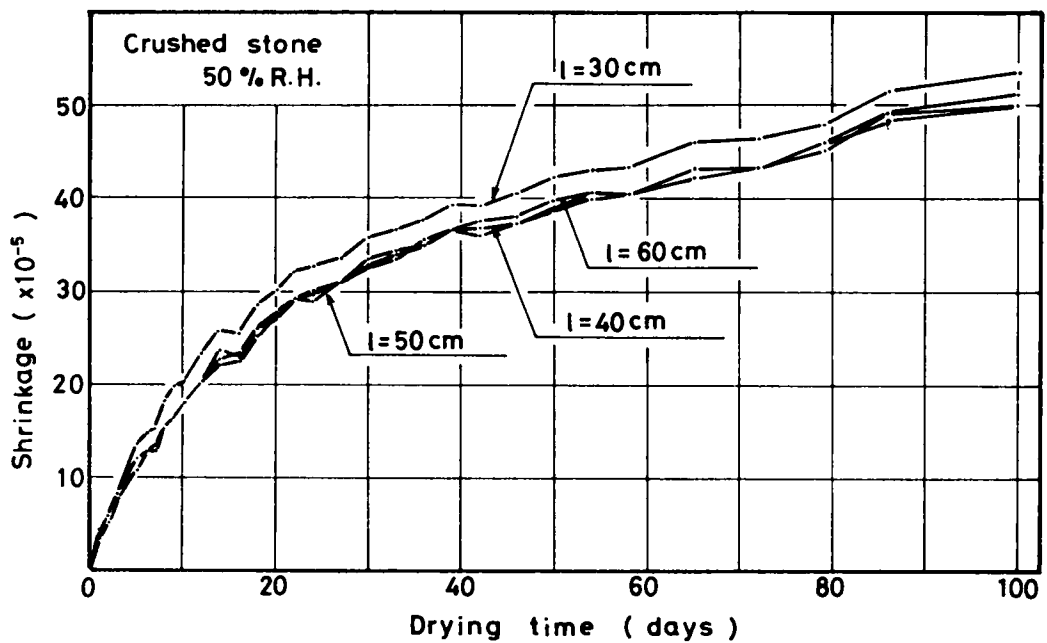


図-4・2 乾燥収縮 — 時間曲線

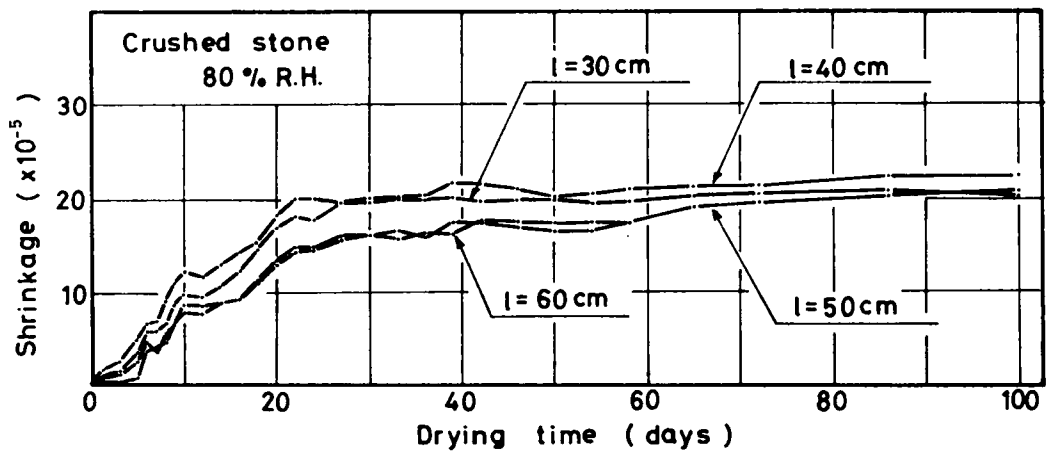


図-4・3 乾燥収縮 — 時間曲線

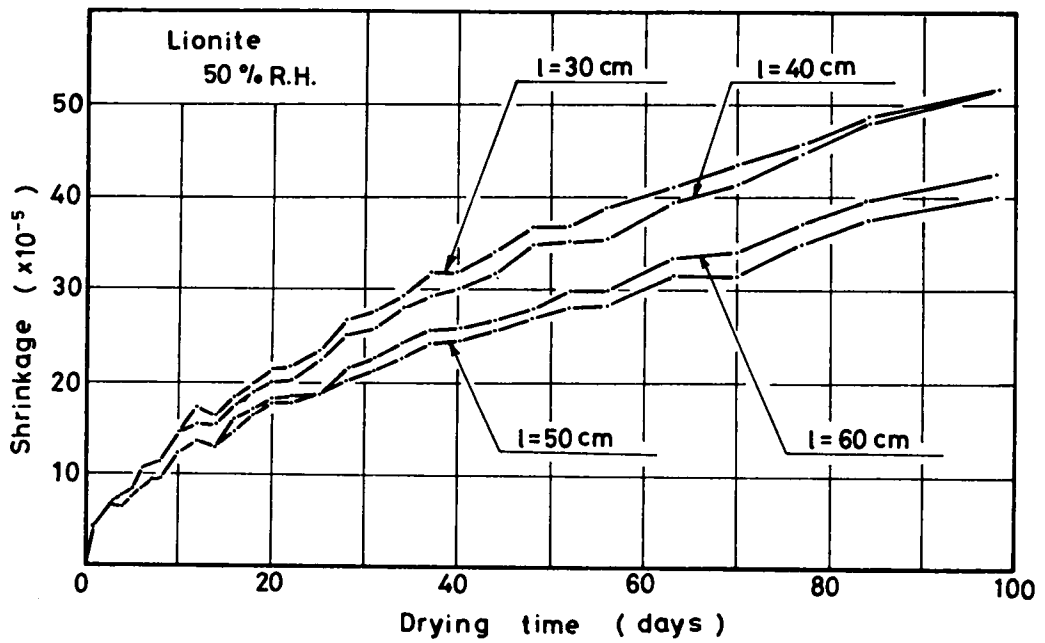


図 - 4 · 4 乾燥収縮 — 時間曲線

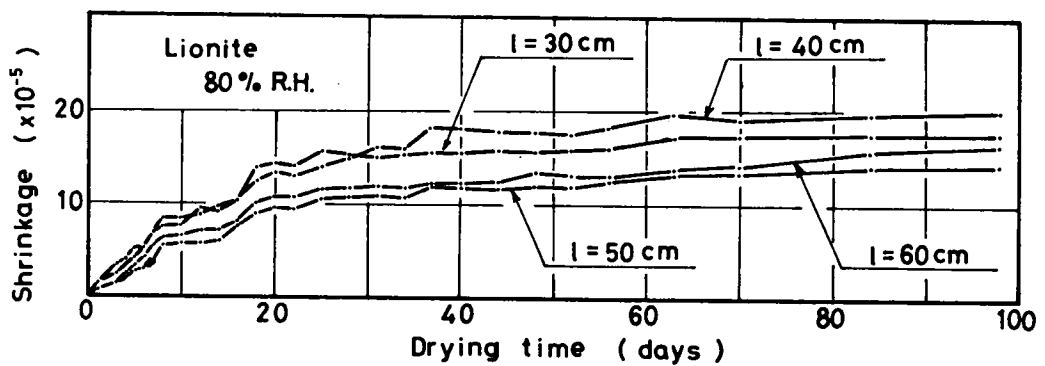


図 - 4 · 5 乾燥収縮 — 時間曲線

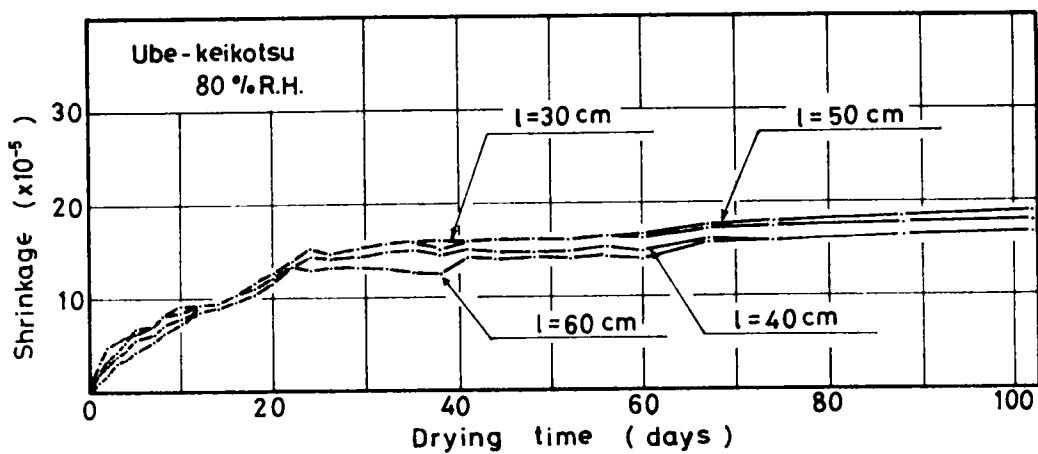


図 - 4 ・ 6 乾燥収縮 - 時間曲線

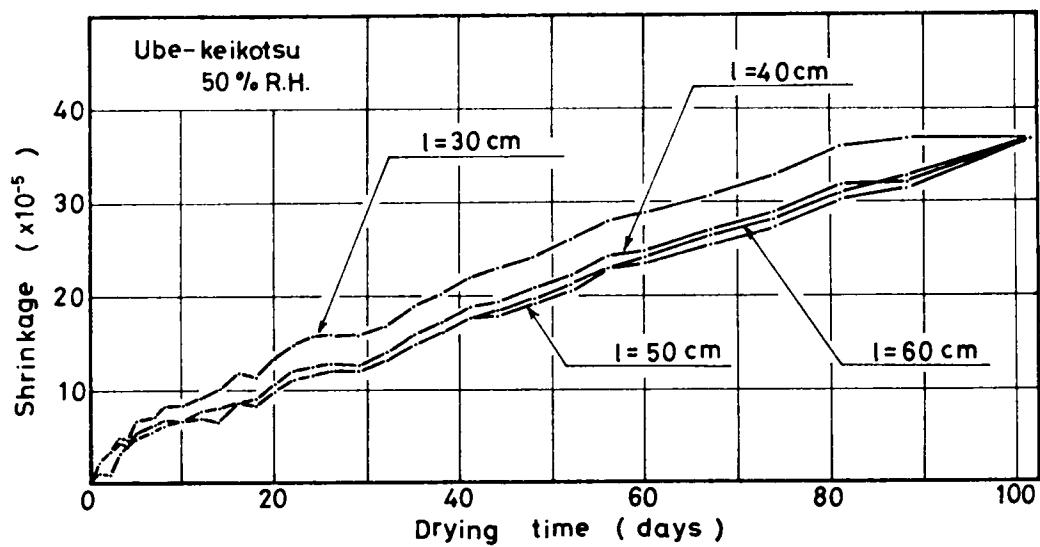


図 - 4 ・ 7 乾燥収縮 - 時間曲線

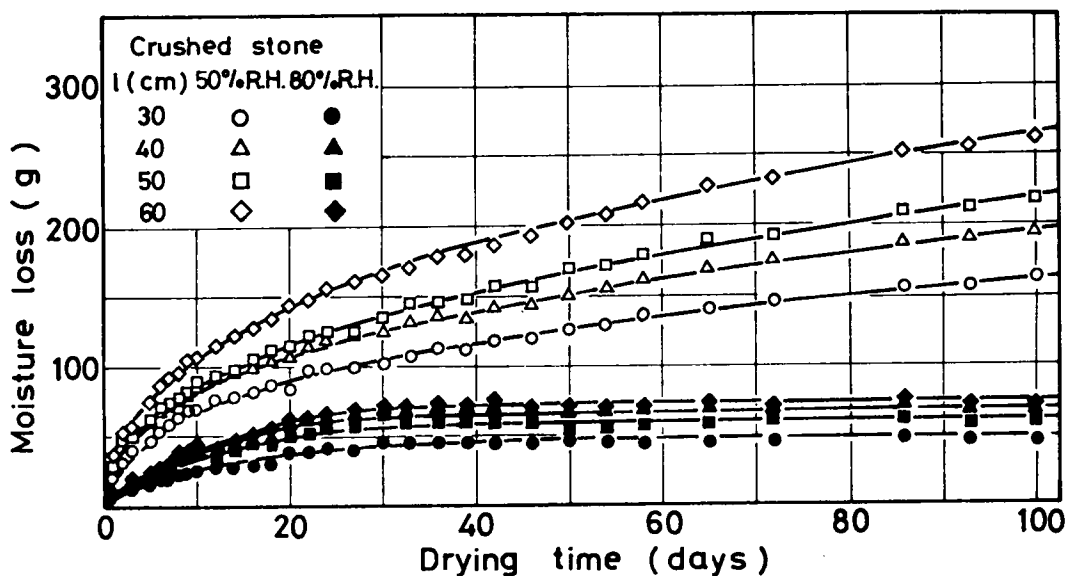


図 - 4・8 収縮供試体の逸散水量 - 時間曲線

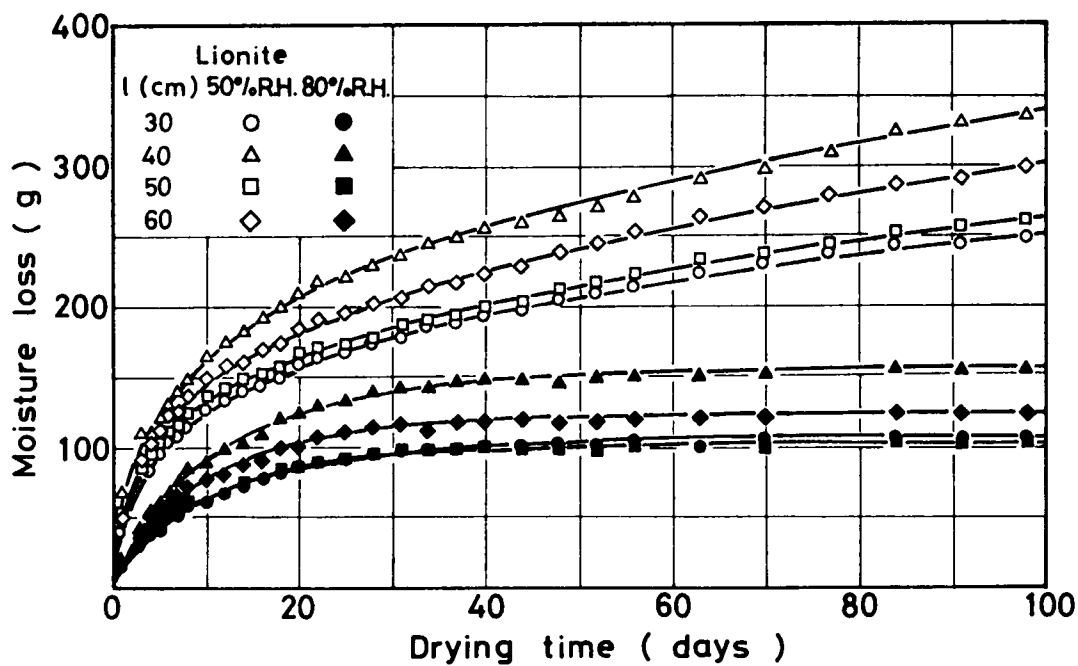


図 - 4・9 収縮供試体の逸散水量 - 時間曲線

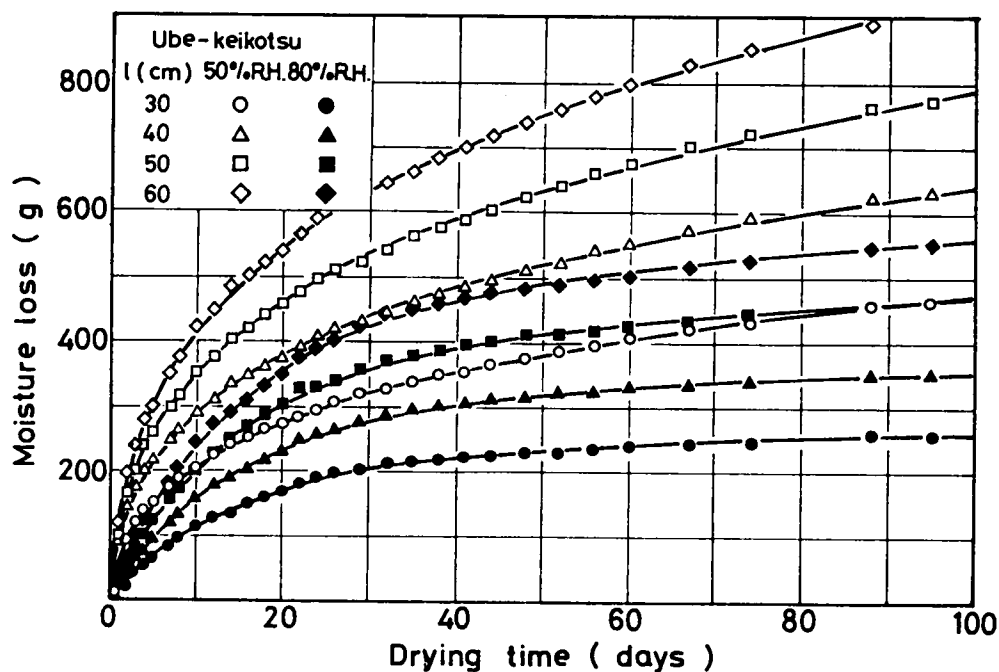


図-4・10 収縮供試体の逸散水量 - 時間曲線

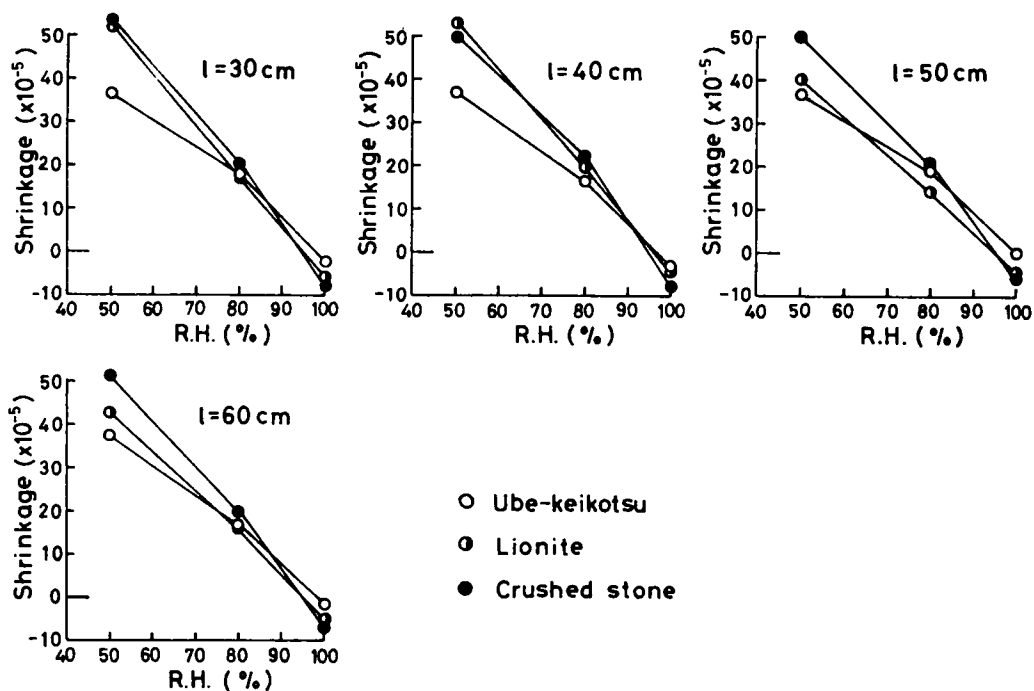


図-4・11 乾燥収縮の環境湿度依存性

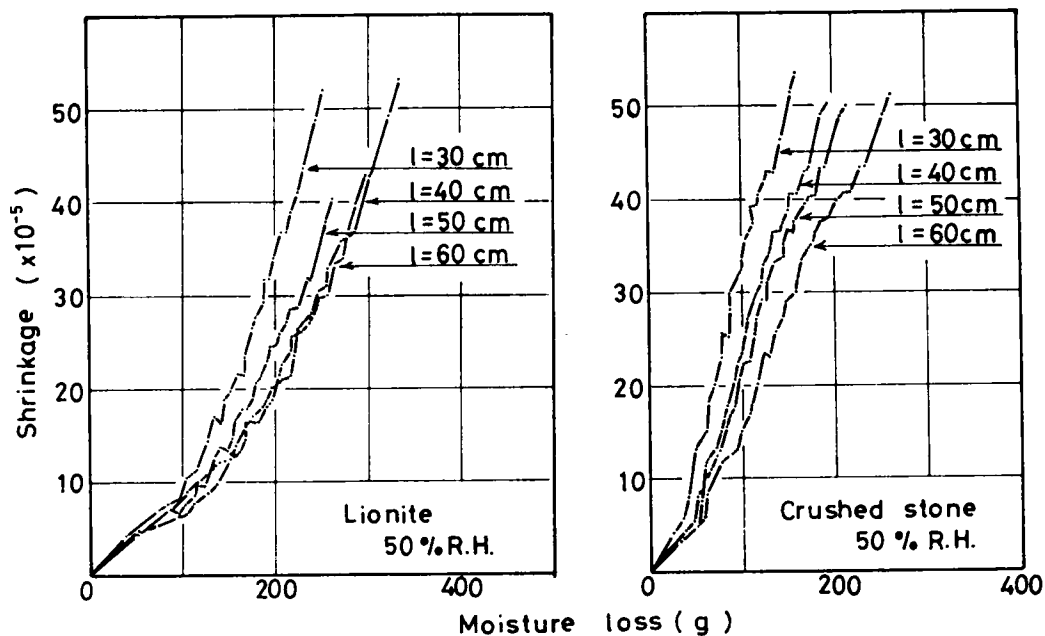


図-4・12 乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係

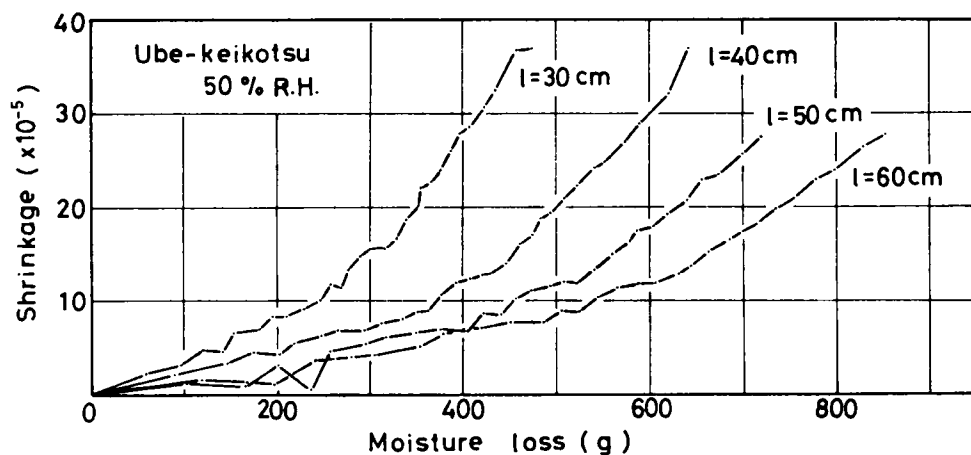


図-4・13 乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係

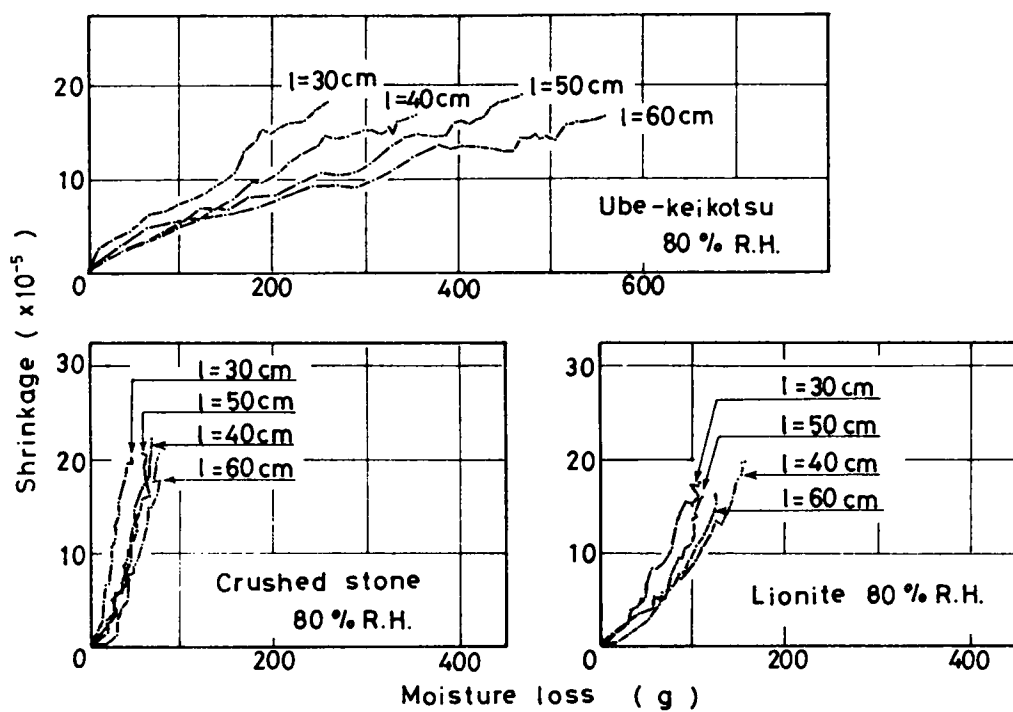


図-4・14 乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係

表-4・7 クリープ試験結果

Types of concrete	R.H. (%)	Sustained load σ_p (kg/cm ²)	Stress at load removed σ_r (kg/cm ²)	σ_r / σ_p	Initial elastic strain ϵ_i ($\times 10^{-5}$)	Elastic strain at load removed ϵ_r ($\times 10^{-5}$)	ϵ_r / ϵ_i	$\frac{\sigma_r / \epsilon_r}{\sigma_p / \epsilon_i}$	Constants of experimental formula *		Ultimate Creep ϵ_c ($\times 10^{-5}$)	Creep factor φ_c	n (A/B) (days)
Crushed stone (N)	50	1250	1021	0.817	30.1	26.3	0.874	0.935	A	B	55.5	1.82	134
	80	1250	1115	0.892	33.6	30.3	0.902	0.989	0.222	0.036	27.7	0.82	61
	100	1250	1031	0.825	31.9	31.0	0.972	0.849	0.459	0.046	21.7	0.68	10.6
Lionite (L)	50	728	542	0.745	50.3	44.4	0.883	0.844	0.330	0.021	47.6	0.94	15.6
	80	728	750	1.030	52.0	44.3	0.852	1.209	0.382	0.036	27.7	0.53	10.6
	100	728	729	1.001	48.4	46.3	0.957	1.046	1.033	0.042	23.8	0.49	24.5
Ube-	50	975	760	0.780	56.6	51.3	0.906	0.861	0.443	0.021	47.6	0.84	21.0
Keikotsu (U)	80	975	938	0.962	54.8	51.0	0.931	1.033	0.456	0.031	32.4	0.59	14.8
	100	975	896	0.919	55.3	49.1	0.888	1.035	0.927	0.044	22.5	0.52	26.5

$$* f_c = \frac{t}{A+Bt}$$

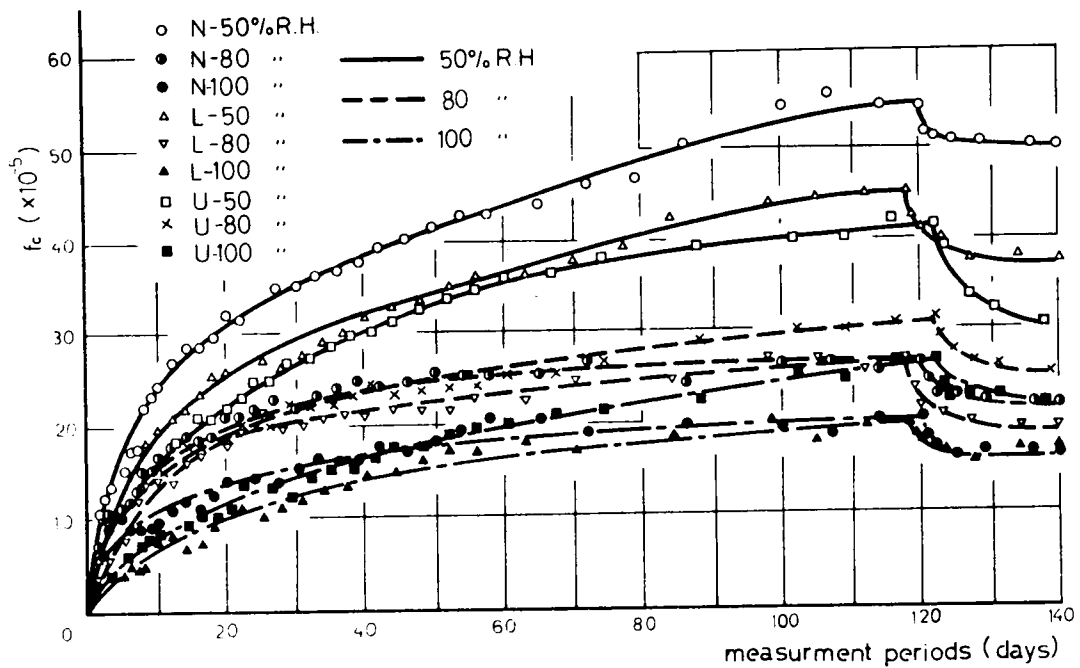


図-4・15 クリープひずみ - 時間曲線

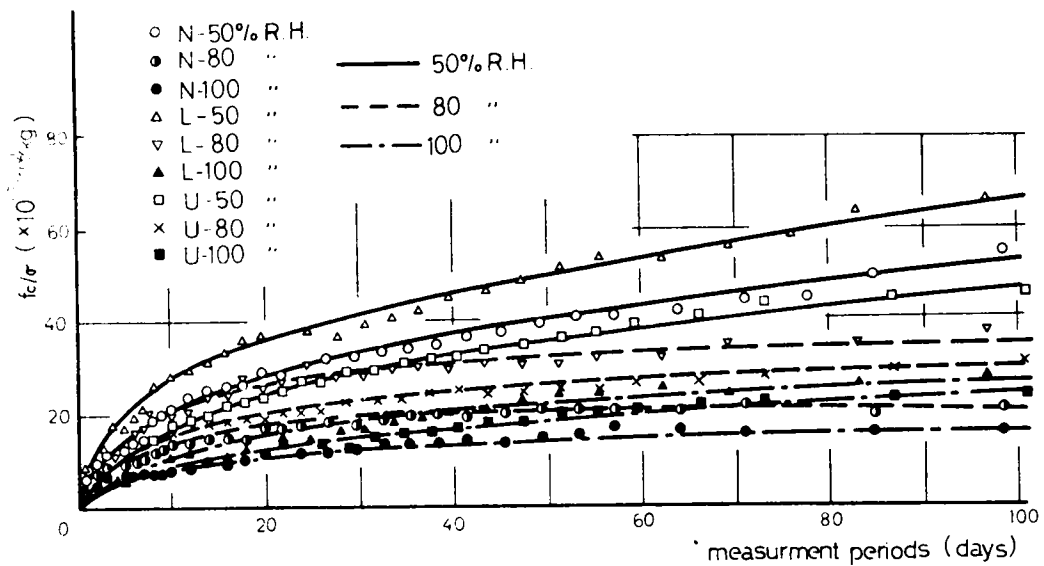


図-4・16 単位応力当りのクリープひずみ - 時間曲線

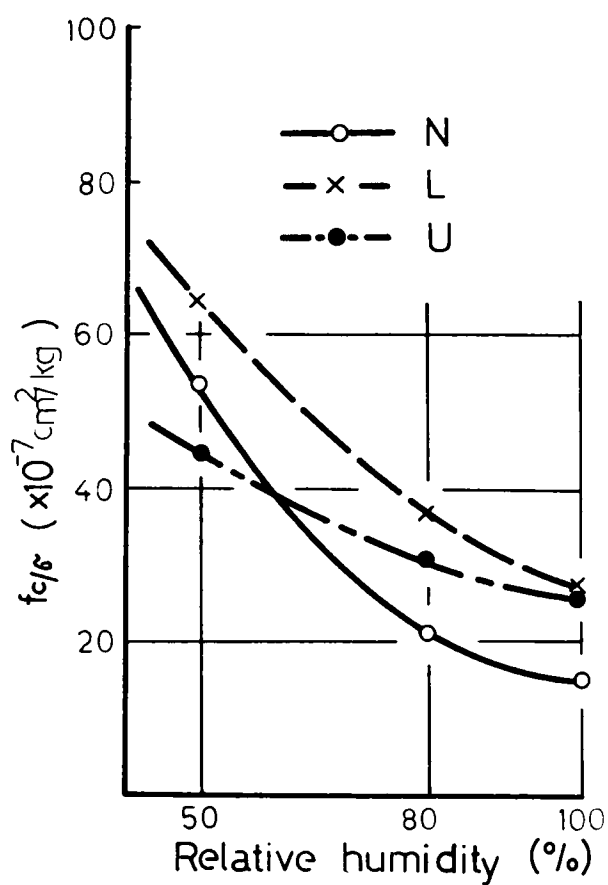


図-4・17 クリープひずみの環境湿度依存性

表-4.8 クリープひずみおよび回復クリープひずみ

Types of concrete	R.H. (%)	Creep f_c ($\times 10^{-5}$)	Creep recovery f_r (10^{-5})	f_r/f_c
N	50	54.3	4.8	0.09
	80	26.0	4.3	0.17
	100	20.2	4.2	0.20
L	50	44.5	7.5	0.17
	80	26.3	7.2	0.27
	100	19.5	3.5	0.18
U	50	41.0	10.6	0.26
	80	31.0	6.2	0.20
	100	22.5	4.9	0.22

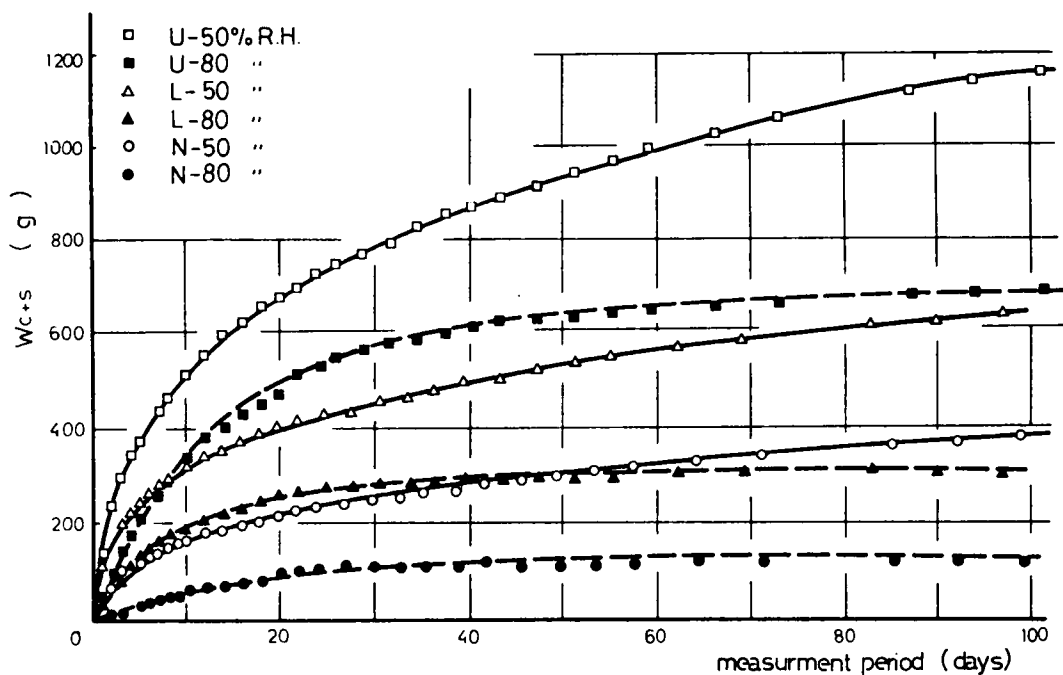


図-4・18 逸散水量 ($W_c + s$) - 時間曲線

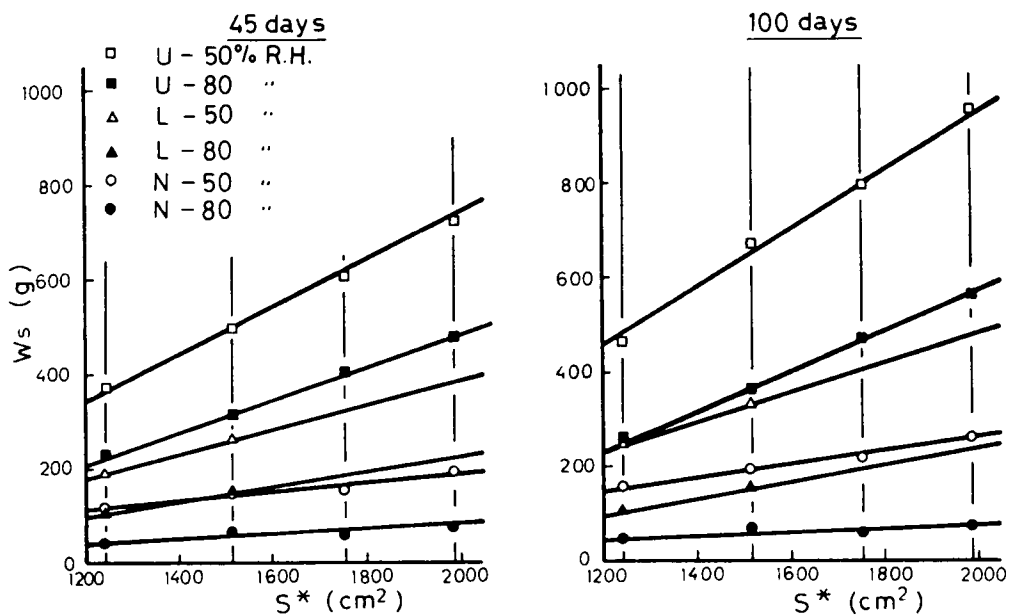


図-4・19 供試体の換算表面積と逸散水量との関係

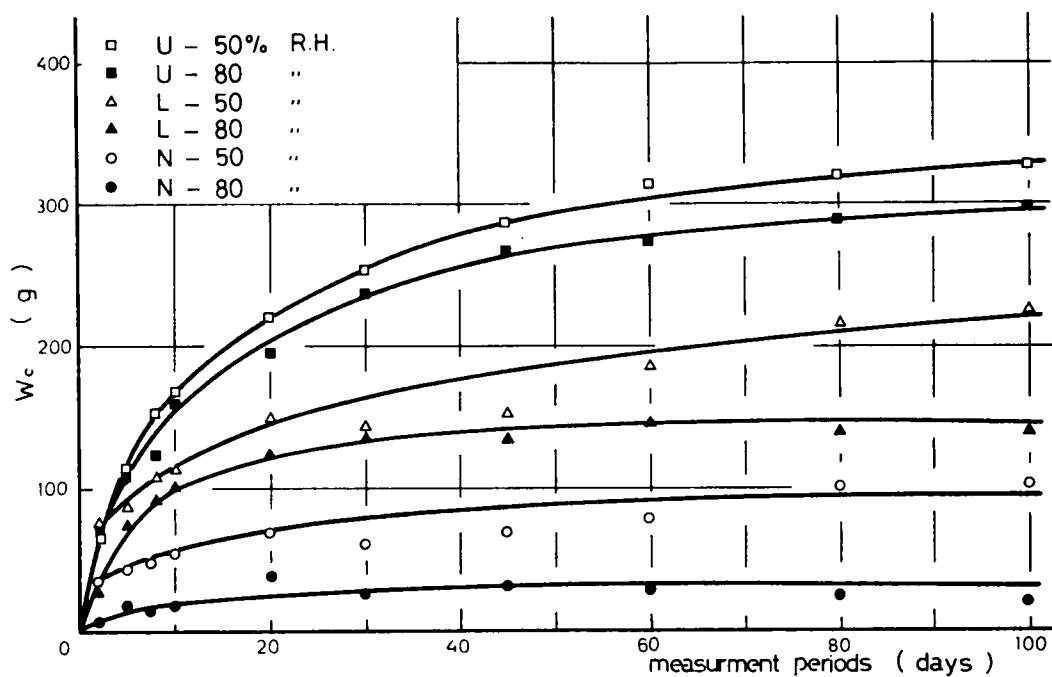


図-4・20 逸散水量 (W_c) - 時間曲線

表-4・9 クリープにともなう逸散水量

Type of concrete	R. H. (%)	Total amount of Water contents W (g)	Moisture loss during 100 days W_c (g)	W_c/W (%)
N	50	745	97	13.0
	80		33	4.4
	100		—	—
L	50	825	220	26.7
	80		148	17.9
	100		—	—
U	50	1659	331	20.0
	80		295	17.8
	100		—	—

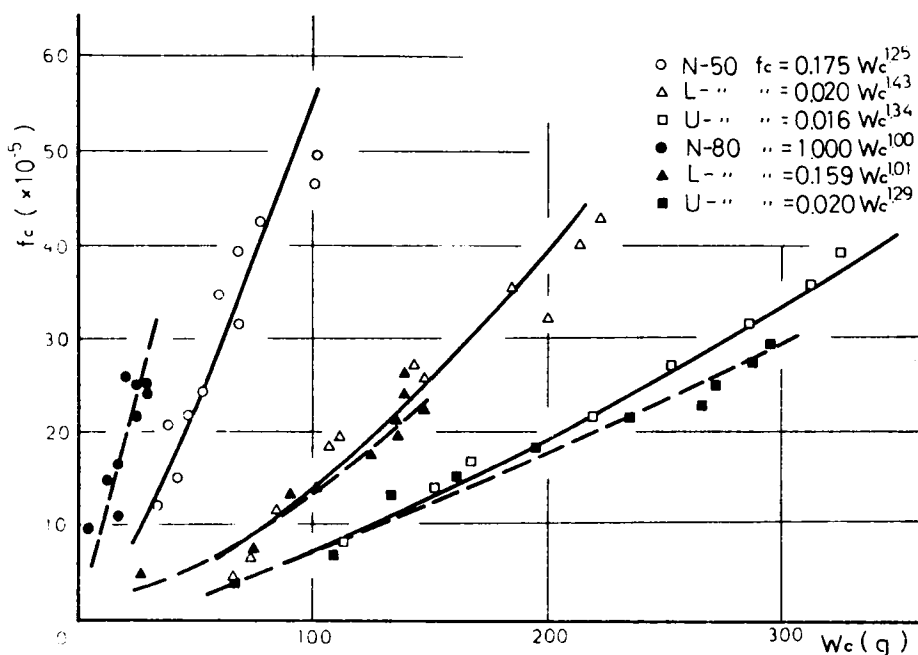


図-4・21 クリープひずみと逸散水量との関係

表-4・10 コンクリートのクリープひずみ成分(実験結果)

Concrete		Normal Concrete			Lionite Concrete			Ube-keikotsu Concrete		
Creep Strain($\times 10^{-5}$)	R.H.	50 %	80 %	100 %	50 %	80 %	100 %	50 %	80 %	100 %
Total Creep		54.3	26.0	20.2	44.5	26.3	19.5	41.0	31.0	22.5
Basic Creep	Irrecoverable	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	17.6	17.6	17.6
	Recoverable	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5	4.9	4.9	4.9
Drying Creep	Irrecoverable	33.5	5.7		21.0	3.1		12.8	7.2	
	Recoverable	0.6	0.1		4.0	3.7		5.7	1.3	

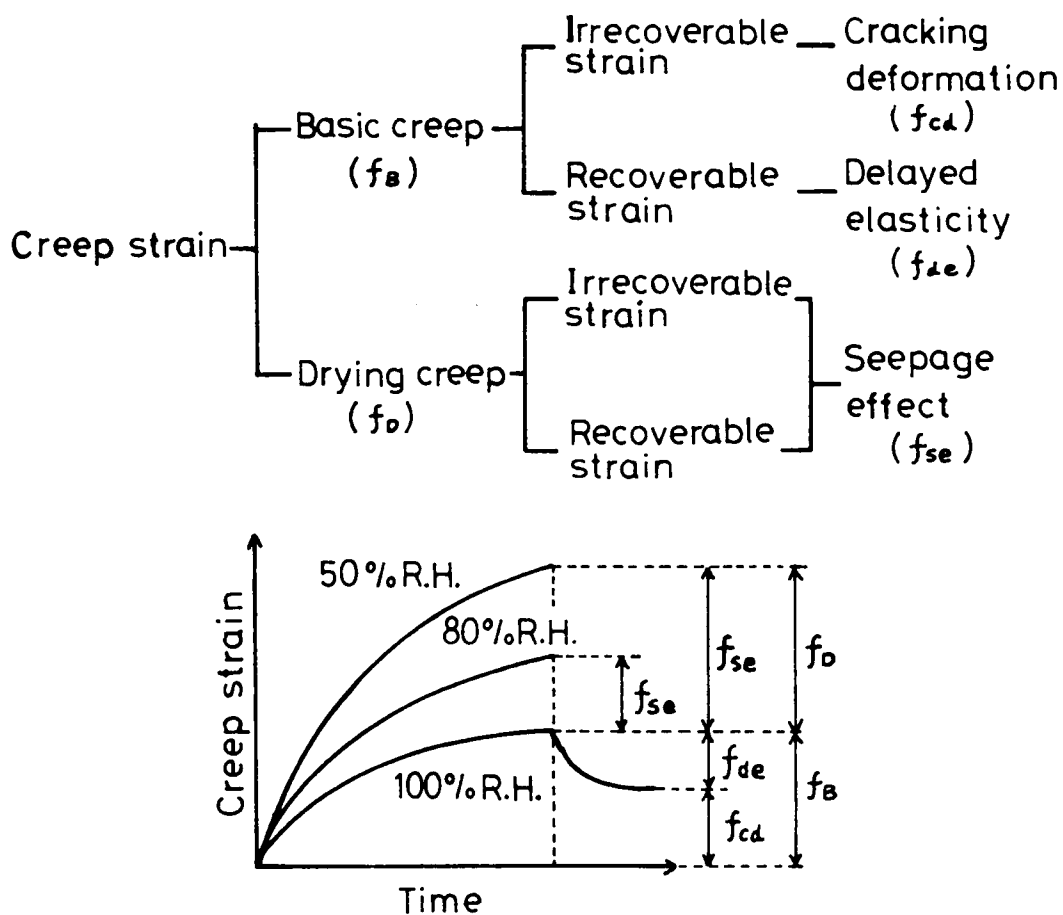


図-4・2・2 コンクリートのクリープひずみ成分

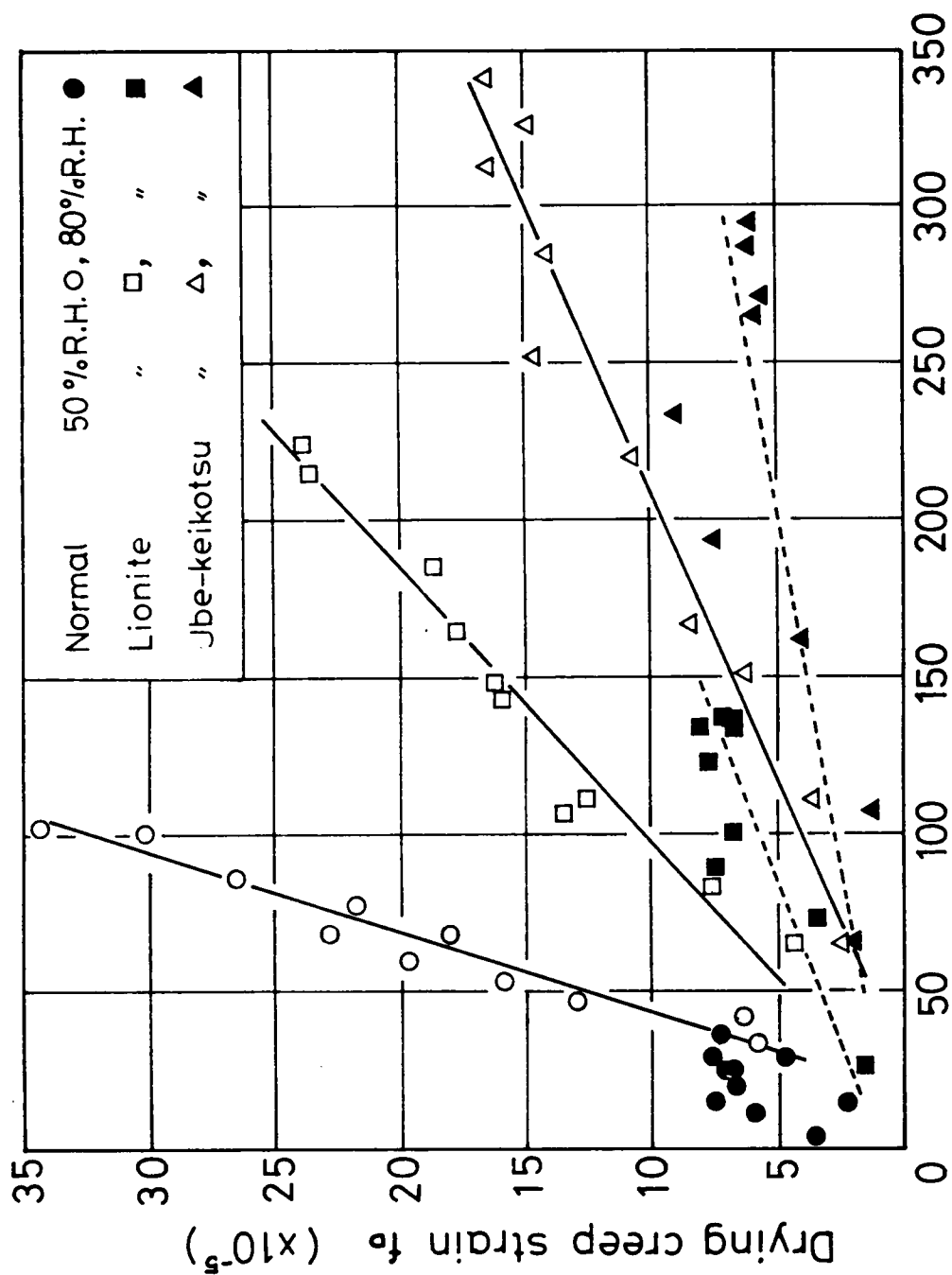


図-4・23 ドライインググループと逸散水量との関係

第5章 持続高応力下におけるコンクリートのクリープ現象に関する研究

5.1 概説と研究目的

静的破壊強度付近の高持続応力下において起こる破壊をクリープ破壊といい、コンクリートにおいてもこの種の破壊現象がみとめられることはすでに述べたとおりである。このような現象は次章で述べる繰返し荷重下における破壊と同様、一種の疲労によるコンクリートの破壊と理解できる。

低持続応力下におけるコンクリートのクリープについては前章で論じたが、それは変形の問題が主で、破壊現象は問題にならなかった。また、内部機構の面から考えても、低持続応力下におけるクリープと高持続応力下におけるそれとは同一に論じることはできないと考えられる。すなわち、静的破壊強度の80～90%程度の高持続応力を受けるコンクリートは、すでに何らかの形で破壊が始まっていると考えられる。したがって、この種高持続応力下におけるクリープの問題を論じる場合には、変形特性のみならず、材料の破壊特性との関連において論じなければならないと考える。

コンクリートのクリープ破壊に関する従来の研究については、2.2で述べたが、いずれの研究においても、破壊に要する時間等の測定値は著しくばらつくのが普通である。このような現象は、ガラスや金属材料等の比較的均質な材料においてもみとめられるが、¹⁾ コンクリートのような複合材料においては、その材料特性も複雑であり、測定値のばらつきは避けられないものであると考えられる。というよりもむしろ、コンクリートのクリープ破壊現象は、本来確率的な性質を有しており、したがって、この種の問題は、一種の確率過程の問題として取扱うべきであると思われる。

本研究は、破壊の面から見たコンクリートのクリープ特性を把握することを主眼とし、普通および軽量コンクリートの高持続応力下における圧縮クリープ試験を行なうものである。また、コンクリートのクリープ破壊現象を確率過程の問題として考え、結果を取扱う際には確率統計的な手法を用いるとともに、材料特性との関連において破壊の機構についても考察する。さらに持続荷重に対するコンクリートの耐久限度（クリープ限）の有無、クリープ破壊におよぼす骨材種別の影響についても検討するつもりである。

5.2 実験計画と実験方法

(1) 使用材料と供試体

実験に使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（大阪社製）で、その物理試験結果を表-5・1に示す。骨材は天然骨材（碎石、川砂）、造粒型人工軽量骨材ライオナイト（大阪社製）、非造粒型人工軽量骨材メサライト（三井社製）および宇部軽骨（宇部社製）の4種類で、その物理的性質を表-5・2に示す。

コンクリートの配合を表-5・3に示す。配合は目標スランプを $5 \pm 1 \text{ cm}$ 、目標強度（ σ_{28} ）を 36.0 MPa とし、ためし練りを行なって決定した。

コンクリートの練混ぜは4切可傾式ミキサーを用いて行ない、締固めは棒突き法によった。供試体は打設後24時間型わく内におき、脱型後はただちに水中に入れ、約6週間の標準水中養生を行なった。強度が十分に発現した後、供試体を水中よりとり出し、その後は試験日まで恒温恒湿室内（ $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{deg.}$ ， $80 \sim 90\% \text{ R.H.}$ ）に保存した。なお供試体はすべて $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体である。

(2) 実験方法

クリープ試験に先立ち、コンクリートの静的強度および静弾性係数を求めた。コンクリートの打設は同一種類のコンクリートでも数回に分けて行なっているため、静的強度は各打設日毎に3本の供試体を用いて求めた。表-5・4には、数回に分けて行なった静的強度試験（材令は100日以上）の全体の平均値を示した。なお、クリープ試験の載荷重を決定する際には、表-5・4の値を用いずに、各打設日毎の静的強度の平均値を用いた。

持続荷重の載荷はREH型電子管平衡式万能試験機（島津社製）の定荷重装置により行なった。ひずみの測定は、供試体の縦方向に2枚、横方向に2枚、合計4枚貼付けられたワイヤストレーンゲージ（測定長： 70 mm ，抵抗： 120Ω ）をピックアップとし、ストレーンアンプ（新興通信社製）で増幅し、X-Yレコーダー（横河社製）により自記させた（図-5・1参照）。なお持続荷重の大きさは静的強度の $65 \sim 97\%$ の範囲である。

以上のような手順でクリープ試験を行ない、X-Yレコーダーで記録されるひずみ-時間曲線を観察し、ひずみ速度が非常に小さくなり（ $1 \times 10^{-6} / \text{min}$ 以下）、ひずみが一定値に収められたと考えられるものについては、それ以上荷重を持続してもクリープ破壊しないものと仮定して、実験を打切った。

5.3 コンクリートのクリープ破壊とその変形特性

表-5・5～5・8および図-5・2～5・3にクリープ破壊試験の結果を示す。なお、表-5・7および5・8に示した軽量コンクリートの試験結果は、骨材の種類別に区別はせず一括して示した。また、表中空欄になっているところはワイヤストレーンゲージが不良であったり、実験の途中においてゲージ部分に入ったクラックによりゲージが断線したりはく離したりしたためひずみの測

定ができなかったものである。表からも明らかなように縦方向に貼付けられたゲージについてはそのようなことはなかったが、横方向に貼付けられたゲージでは、はく離したり、縦方向のひびわれによって断線したりしてかなりの数のゲージが測定不能になった。

図-5・4および5・5にクリープ破壊曲線のうちの代表的なものを示す。図より明らかなように、コンクリートのクリープ破壊曲線は、金属材料や土質材料等の他の材料と同様に、変形速度が時間とともに減少する遷移クリープ部分、変形速度が時間に無関係に一定かつ最小の定常クリープ部分および変形速度がしだいに増大してついに破壊にいたる加速クリープ部分の3段階に分けることができる(図-5・6参照)。なお、実験に供した供試体のうち破壊したすべての供試体においてこのような区分ができたわけではない。表-5・9~5・13にクリープ破壊したすべての供試体の各クリープ段階におけるひずみ量と各クリープ段階に要した時間を示したが、そのうち空欄になっているところは、ゲージが不良でひずみ量の測定ができなかったもの、あるいは、ひずみ量の測定ができて各クリープ段階の区別が明確でなかったものである。

クリープ破壊曲線の第1段階として現われる遷移クリープ部分の曲線の形状は、前章で論じた低持続応力下における曲線と類似している。このような事実により、遷移クリープを低持続応力下におけるクリープと同様に考察しようとする試みがなされているが、^{2),3)} 後述するように必ずしも適切な方法ではないと思われる。また、堀²⁾は遷移クリープから定常クリープへ移行するときのひずみ量は、応力の大きさにかかわらずほぼ一定(約 2.4×10^{-4})であると述べている。これはコンクリート内部の弾性的な構造に作用する応力が一定に達するとともに定常クリープへと移行することを意味するものであり、遷移クリープ段階においてはまだ破壊は始まっていないと考えているようである。表-5・9~5・13に示した本研究の結果によれば、遷移クリープひずみ量は必ずしも一定とはみなしがたい。

遷移クリープを表わす式は種々提案されているが³⁾、それらは低持続応力下におけるクリープ曲線を表わすために提案されたものであり、本研究におけるような高持続応力下におけるクリープに適用するのは必ずしも適切でない。

一般には、パネとダッシュポットを組合せたコンクリートのレオロジーモデルを考え、そのモデルに対するレオロジー方程式の係数を実験結果より決定する方法がとられている。いま、レオロジーモデルを図-5・7のように考えると、そのレオロジー方程式は式(5.1)で表わされる。

$$f_t = a_1 + a_2 \ln(t + 1) \quad \text{-----} \quad (5.1)$$

ただし、 a_1 、 a_2 は載荷応力に関係する係数である。

図-5・7に本実験の結果の一例を示したが、普通および軽量コンクリートいずれの場合も遷移

クリープひずみ量 f 、と時間 $\log(t+1)$ との間には、直線ないしは直線に近い関係がみとめられる。したがって、遷移クリープは式(5.1)で表わされることが確かめられるが、このレオロジーモデルが高持続応力下のクリープ変形において、いかなる物理的な意味を有するかは明らかでない。

低持続応力下のクリープに対しては、パネ(E_1)が弾性的な骨組構造の変形を表わし、パネ(E_2)とダッシュポットがセメントゲル中の吸着水(ゲル水)や、空げき中のキャピラリー水の移動による変形を表わすものと解釈されているが⁴⁾、後にも述べるように、高持続応力下でのクリープ変形については、ゲル水等の移動による変形(シーページ効果)よりもむしろマイクロクラックの成長による変形が支配的であると思われるので、たとえクリープひずみ曲線がこのようなレオロジー方程式で表わされるとしても、その内部機構を説明することは、本質的に無理であると思われる。

前に示した表-5.9~5.13には、各クリープ段階におけるクリープひずみ量と全クリープひずみ量に対するそれぞれの割合、ならびに各クリープ段階に要する時間と破壊に要した時間に対するそれぞれの割合を示した。それらの全体の平均値を求めたのが表-5.14であり、また、それを模式的に表わしたのが図-5.8である。図-5.8によれば、コンクリートのクリープ破壊における変形特性の全体的な傾向が概略的にはあるが、ある程度うかがわれる。

まず縦方向のクリープひずみについては、普通および軽量コンクリートいずれの場合も、遷移クリープ部分がもっとも大きな割合を占めており、定常クリープ部分がもっとも少ない。一方、加速クリープ部分は、普通コンクリートにおいては定常クリープ部分よりも若干大きい、軽量コンクリートでは定常クリープ部分とほぼ同一の割合を占めている。

横方向のクリープひずみをみると、普通コンクリートの加速クリープはもっとも大きな割合を占めており、縦方向のひずみの場合とはかなり異なっているが、軽量コンクリートの加速クリープの占める割合は、普通コンクリートのそれほど大きくはない。

また、各クリープ段階に要する時間の割合をみても、普通コンクリートと軽量コンクリートとは、やや異なる点がみとめられる。すなわち、普通コンクリートにおいては、各クリープ段階の占める時間の割合に大差はないが、軽量コンクリートでは、定常クリープに要する時間がもっとも大きな割合を占め、加速クリープの占める割合は小さい。なお当然のことではあるが、縦方向の各クリープ部分の占める時間の割合と横方向のそれとは、普通および軽量コンクリートいずれの場合にも大差はない。

このように普通コンクリートと軽量コンクリートとで、その変形挙動に若干の相違のあることは、両者のクリープ破壊の機構に相違のあることを示唆するものである。このような両者の変形

破壊特性の相違をより明確にするために、図-5・9に各クリープ段階の始点および終点における横方向のひずみ（初期弾性ひずみとクリープひずみの和）と縦方向のひずみの比（ポアソン比と呼ぶ）を図示した。図-5・9は、表-5・9～5・13に示した、各クリープ段階の区別がはっきりとした供試体の全体の平均値を示したものである。また、参考のため、破壊しなかった供試体については、その始点と終点のポアソン比の値を示した。

図-5・9によれば、普通コンクリートのポアソン比は、遷移クリープおよび定常クリープ段階においては、ほぼ一定の割合で増大し、定常クリープ終了時には0.55にまで達し、加速クリープ段階になれば急激に増大し、破壊時には0.96にまで達する。いっぽう、軽量コンクリートの場合は、普通コンクリートの場合ほどポアソン比の増大は顕著でなく、クリープ変形にともなう体積増加が著しいが、軽量コンクリートの場合はそれほど顕著なものではないといえる。このような両者の変形特性の相違は、両者の材料特性の相違、すなわち粗骨材の相違に起因するものではないかと思われる。普通コンクリートでは、粗骨材の強度が強いため、時間の経過とともに生長するクラックが骨材をさけて伸展するため、加速クリープ段階に要する時間がながくなり、また変形も大きくなるが、軽量コンクリートでは骨材自身の強度も弱いため、骨材の存在によってクラックの伸展が妨げられることも少なく、そのため加速クリープ段階におけるひずみ量も小さく、また時間も短くなるのではないかと思われる。一般に、低持続応力下のクリープ試験におけるポアソン比は、クリープ変形の進行にかかわらずほぼ一定、ないしはクリープ変形の進行とともに減少するといわれており、Polivka⁵⁾の実験によれば、クリープ試験終了時のポアソン比は、0.15～0.17程度である。これは、低湿度下、低持続応力下のクリープ生成機構の一部がシーページ理論で説明されることから想像できることであり、クリープ変形とともに体積が減少することを示している。ところが本研究のような高持続応力下におけるクリープ試験においては、コンクリートの種類によって多寡はあるにしても、クリープ変形にともなう体積は増加する傾向にある。したがって、高持続応力下におけるクリープの内部機構は、持続荷重の載荷によってコンクリート内部に発生したマイクロクラックが時間とともに生長していくことによるものであり、とりわけ普通コンクリートにおいては縦方向のクラックが発達していると考えられる。

いずれにしろ、コンクリートのクリープ破壊においては、その遷移クリープを式(5.1)のようなレオロジー方程式で近似することは可能であっても、その生成機構は低持続応力下のクリープのそれとは異なり、上述のごとく遷移クリープ段階においても、すでに何らかの形で破壊に結びつき得るような重大な損傷が始まっていると考えるべきであろう。

コンクリートがクリープ破壊をする場合には、遷移クリープに続いて定常クリープが現われる。定常クリープは図-5・8よりも明らかなように、ひずみ量も遷移および加速クリープ部分に比較して一般に少なく、ひずみ速度は一定かつ最小となる。

堀⁶⁾は、モルタルの曲げクリープ破壊試験において、載荷した持続応力の大きさと定常クリープ速度との間には、直線的な関係があることを明らかにしている。すなわち、載荷した持続荷重の大きさにより定常クリープ速度が一意的に定まるとしている。また、桜井³⁾の行なったモルタルの圧縮クリープ破壊実験においては、破壊しなかった供試体については、持続応力の大きさと定常クリープ速度との間には直線関係が成立するが、破壊したものについては、そのような関係はみとめられない。本実験の結果でも、表-5・9～5・13より明らかなように、持続応力と定常クリープ速度との間には一意的な関係は見られない。前述のごとく、遷移クリープ段階において重大な損傷が始まっていると考えられる本実験においては、このような結果はむしろ当然のように思われる。堀は、少なくとも定常クリープ段階までは、載荷した持続応力の大きさ等により決定論的に論じられ、加速クリープの現われ方が確率的であるとする見解を示しているが、筆者はそのような見解を支持するものではなく、遷移クリープひずみ量、定常クリープひずみ量および定常クリープ速度等の特性値は、載荷した持続応力によって一意的に定まるものではなく、まったく確率的な値をとるものであると考える。換言するならば、ひずみ量が確率的であるというよりも、各クリープ段階に要した時間が確率的に分布していると考えられるのである。この点について、つぎに考察する。

5.4 コンクリートのクリープ破壊の確率論的性質

前節においては、変形特性の面からコンクリートのクリープ破壊を論じ、クリープ破壊するものについては、遷移クリープ段階においてすでに破壊に結びつき得るような重大な損傷が始まっていると考えられること、遷移クリープから定常クリープへ移行するときのひずみ量や定常クリープ速度などが載荷した持続応力によらず著しくばらついていることなどを明らかにした。そのことから推測されるように、コンクリートのこの種の問題は、決定論的に論じることは不可能であり、確率論的に論じるべきであることを示唆している。また、図-5・2および5・3からも明らかなように、同一の応力下においても破壊に要した時間は著しくばらついており、このことから、コンクリートのクリープ破壊の問題は、一種の確率過程として取扱うべきであると考えられる。

次章で詳述するように、金属材料等のおくれ破壊の確率過程理論においては、任意の時刻 T において破壊の発生する確率（推移確率） $\mu(T)$ と時刻 T まで破壊が発生しない確率（生

存確率) $P(T)$ との間には, μ を時間に無関係に一定であると仮定すると, 次式のような関係が成立する。⁷⁾

$$1 - P(T) = -\mu T \quad \text{-----} \quad (5 \cdot 2)$$

なお, 順序統計量の理論により, $P(T)$ は, 一般に式 (5・3) により計算される。

$$P(T) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad \text{-----} \quad (5 \cdot 3)$$

ただし, r は破壊に要した時間の小さいものからの序数であり, n は同一応力比における破壊した供試体の数である。

図-5・10 に本実験の結果より T 分後まで破壊しない確率を式 (5・3) により求めそれを対数目盛に, T を普通目盛にとって図示した。ここでは結果の一部について示したが, 両者の関係はほぼ下に凸な曲線で表わされ, 推移確率が時間とともに低下し, 式 (5・2) に示したような関係は成立しない。すなわち, コンクリートのクリープ破壊における破壊に要した時間の分布は, 一次ポアソン過程には従わないといえる。

⁸⁾ 吉本らは, セメントモルタルの曲げクリープ破壊試験において, このような現象を観察し, 推移確率が時間とともに低下するのは, セメントペースト中に発生する多数のマイクロクラックにより, 砂粒の周囲のボンドクラック先端の応力緩和が起こるためであると説明しているが, 本実験の範囲では, 吉本らのように微視的な破壊の機構についてまで論じることはできない。

図-5・11 は各クリープ段階に要した時間の分布を示すものである。すなわち, 各クリープ段階に要した時間を対数目盛で横軸に, 任意の時刻 t においてつぎのクリープ段階に移行しない確率 $P(t)$ を確率目盛で縦軸にとった対数正規確率紙上にプロットしたものである。

図-5・11 には, 同一応力比において破壊したすべての供試体につき, 各クリープ段階の区別が可能であった普通コンクリートの $S = 96 \sim 97\%$ についてのみ示したものである。図によれば, いずれのクリープ段階に要した時間の分布も, ほぼ直線で近似でき, 対数正規分布することがわかる。また, そのばらつきの程度も, クリープ段階の違いによる差異はない。

つぎに, 図-5・12 に上述の $P(t)$ と各クリープ段階に要した時間とを, 図-5・10 と同様に, 片対数紙上にプロットすると, 各クリープ段階に要した時間の分布も直線とはならず, 下に凸な曲線となることがわかる。

以上のことより, 各クリープ段階は, 時間とともに低下する推移確率を有する確率過程であり, 任意の時刻に, 確率的につぎのクリープ段階および破壊へと移行すると考えることができる。また, 各クリープ段階に要した時間の分布は, 対数正規分布する。

推移確率が時間とともに低下するということは、あるクリープ段階に要する時間が長いほどつぎのクリープ段階に移行し難いことを意味する。表5・9～5・13によれば、一般に、遷移クリープ段階に要する時間の長い供試体は、その後のクリープ段階に要する時間も長く、破壊に要する時間も長くなっている。このような破壊までの時間の大小と変形挙動との間に何らかの関連があるのかどうかということは興味ある問題である。

図-5・13および5・14は、それぞれ、普通および軽量コンクリートの縦方向の定常クリープ速度と破壊に要した時間との関係を示したものである。図からも明らかなように、両者の間には、ほぼ指数関数的な関係がみられ、定常クリープ速度が小さくなるほど破壊に要する時間は長くなる。すなわち、定常クリープ速度がコンクリートのクリープ破壊に要する時間を決定する重要な要因であるといえる。

本研究においては、クリープひずみが一定値に収れんしたものは、以後荷重を持続しても、クリープ破壊しないものと仮定して実験を打ち切ったが、図-5・12および5・13によれば、本実験のような短期間のクリープ試験においては定常クリープ速度が $1 \times 10^{-6} / \text{min}$ 程度になれば、破壊に要する時間は無限に大きくなり、本研究における仮定の妥当性がみとめられる。またこのことより、クリープ限が存在することがうかがわれる。

5.5 破壊に要する時間（寿命）の分布とクリープ限

コンクリートの耐久限度の有無については議論のわかれるところであり、一般に、繰返し荷重に対する耐久限度（疲労限）は存在しないといわれている。⁹⁾ところが、前節でもふれたように持続荷重に対する耐久限度（クリープ限）は存在すると考えてよいようである。従来の研究¹⁰⁾においては、コンクリートのクリープ限は静的強度の75～90%程度といわれているが、いかなる方法によって決定されたものであるかは明らかでない。それらの研究のうち、坂は、持続応力載荷時の弾性ひずみが 1000×10^{-6} を越えるとクリープ破壊が起こるとし、クリープ限は静的強度の76%であるとしている。このような手法を本研究の結果に適用すると、普通コンクリートのクリープ限は68%となるが、実験結果からみるとかなり低いようである。

いっぽう、前節で各クリープ段階に要する時間の分布が対数正規分布することが明らかになった。したがって、それらの和である破壊に要する時間の分布も対数正規分布することが予想される。

図-5・15～5・22は、同一応力比における破壊に要した時間と生存確率との関係を、対数正規確率紙上にプロットしたものである。図からも明らかなように、両者の関係は直線で近似でき、同一応力比における破壊に要する時間は、対数正規分布することがわかる。

対数正規確率紙上で観測値が直線で近似できるとき，その直線と $P = 50\%$ なる横軸との交点が平均値であり，直線の傾きが標準偏差を表わす指標となる。

図-5・15～5・22に示したように，それぞれの応力比における T の分布を直線で近似し（最小2乗法で決定する），各平均値を求めると，図上に示したような値になる。また，各応力比に対する直線の傾きも大差なく，したがってばらつきの程度は，応力比によらずほぼ同程度と考えられる。このようにして得られた各応力比における破壊に要する時間の平均値と応力比との関係を図示したのが図-5・23である。それらはほぼ直線で近似でき，最小2乗法によって直線式を求めると次式のようなになる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{普通コンクリート} & ; \quad S = -15.09 \log T + 108.4 \\ \text{軽量コンクリート} & ; \quad S = -6.79 \log T + 97.5 \end{array} \right\} \text{----- (5・4)}$$

ここに， S ：応力レベル， T ：荷重持続時間

コンクリートの疲労試験においては，疲労限を特性値にとらず， $S-N$ 直線において，あらかじめ定められたある繰返し回数（通常は200万回）における応力比をもって疲労強度と定めている。そしてこの200万回という値は，コンクリート構造物が耐用年数内に受けると予想される繰返し荷重の回数であると考えられている。このような手法でクリープ試験における時間強度が決定できないかどうかを検討する。

いまコンクリート構造物の耐用年数を30年と仮定し，式(5・4)にこれを外挿して時間強度を求めると，普通コンクリートおよび軽量コンクリートのそれは，それぞれ，0%および48.6%となる。このようなことは現実には考えることはできない。このことからコンクリートのクリープ限は存在すると考えるべきであろう。

つぎに，クリープ限をいかなる方法によって決定するかということが問題になる。

前にも述べたごとく，同一の持続応力を受ける個々の供試体のクリープ限は一定ではなく，クリープ破壊するか否かは，まったく確率的なものであると考えられる。このような現象は殺虫剤の試験にその類似を求めることができる。すなわち，薬量と昆虫の死ぬ数の割合を，統計の問題とし，約50%の昆虫が死ぬときの薬量を求める *Probit Analysis*¹¹⁾ の手法を本実験結果に適用して，平均のクリープ限を求める。

表-5・15に示すように，適当に選んだ応力比の範囲における供試体の数と破壊しなかった供試体の数とその確率を求める。この生存確率と応力比との関係を正規確率紙上にプロットすると，図-5・24のようになる。図上で得られた直線と確率50%の横軸との交点における応力

比が平均クリープ限である。このような手法で得られる平均クリープ限は、普通および軽量コンクリートで、それぞれ、84.5%および83.8%となる。したがって、式(5・4)は次式のようになる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{普通コンクリート} & : S = -15.09 \log T + 108.4 \quad \geq 84.5(\%) \\ \text{軽量コンクリート} & ; S = -6.79 \log T + 97.5 \quad \geq 83.8(\%) \end{array} \right\} (5 \cdot 5)$$

なお、軽量コンクリートの場合、図-5・24において、2点により直線を決定している。このようなことが可能かどうかを確かめておく必要がある。そのために、図-5・25に、軽量コンクリートの各応力比における10分および20分における生存確率を求めて図示した。いずれの場合も生存確率と応力比との間には直線関係が成立する。したがって、平均クリープ限を求める直線は、図-5・25においても $t = \infty$ におけるものと考えられ、たとえ2点からであっても直線で近似することが可能である。

ヨーロッパコンクリート委員会の「終局強度理論による鉄筋コンクリート設計施工基準¹²⁾」では、クリープ限として、載荷時の材令が28日のコンクリートで8.2%、材令1年のもので7.6%を与えており、本研究の結果とそれほど大差はない。

5.6 結 論

本章においては、コンクリートの時間的な遅れを有する破壊のうち、持続応力下における破壊について論じた。実験に供した供試体数が少なかったこと、ひずみの測定の方法が必ずしも適切でなかったことなど、今後検討すべき点があると思われるが、本研究の範囲で明らかになったことを列挙して結論とする。

- 1) コンクリートのクリープ破壊曲線は、金属材料のそれと同様、変形速度が時間とともに減少する遷移クリープ、変形速度が時間に無関係に一定かつ最小となる定常クリープおよび変形速度がしだいに増大して破壊にいたる加速クリープの3つの部分からなる。
- 2) 普通コンクリートと軽量コンクリートのクリープ破壊の様相は若干異なり、各クリープ段階におけるひずみ量が全クリープひずみ量に占める割合や、各クリープ段階に要した時間が破壊に要した時間に占める割合もやや異なる。このような相違は、両者の材料特性の相違によるものと思われる。
- 3) 高持続応力下における普通コンクリートのポアソン比は、低持続応力下のそれとはかなり異なり、遷移クリープ段階においても、すでに体積の増加がみとめられる。これはコンクリート内部に発生したクラックが時間とともに発達することによるものであると考えられ、遷移クリ

ープ段階においても、破壊に結びつくような重大な損傷がおこっている。なお、軽量コンクリートのポアソン比は普通コンクリートのそれよりもかなり小さいが、ほぼ同様の傾向を示す。

- 4) 同一応力比であっても、破壊に要する時間は著しくばらついており、この種クリープ破壊の問題は確率過程の問題として取扱うべきである。
- 5) 同一応力比における各クリープ段階に要した時間の分布は対数正規分布し、各クリープ段階による差はみとめられない。また、この場合の推移確率は、時間とともに低下し、遷移クリープ段階に要する時間の長いものは、その後のクリープ段階に要する時間も長くなり、破壊に要する時間も長くなる。
- 6) 同一応力比における破壊に要する時間の分布は対数正規分布する。また、そのときの推移確率も時間とともに低下する傾向にある。
- 7) 定常クリープ速度と破壊に要する時間との間には、ほぼ指数関数的な関係があり、定常クリープ速度が小さくなれば破壊までの時間は長くなる。
- 8) コンクリートのクリープ限は存在すると考えられ、普通コンクリートおよび軽量コンクリートの平均クリープ限は、それぞれ、静的強度に対する割合で、84.5%および83.8%である。

〈 第 5 章 参 考 文 献 〉

- 1) 横堀武夫, “ 材料強度学 ” 技報堂, 1955年
- 2) 堀 素夫, “ セメントおよびコンクリートの破壊現象に関する確率論的研究 ”
学位論文, 昭和36年2月
- 3) 桜井春輔, “ セメントモルタルのクリープ変形と破壊に関する実験的研究 ”
土木学会論文報告集, №217, 1973年9月,
- 4) O. Ishai, “ Elastic and Inelastic Behavior of Hardened
Mortar in Torsion ” Symposium on creep of concrete,
ACI Special Publication №.9, 1964年
- 5) A.M.Neville, “ Creep of Concrete : Plain, Reinforced and
Prestressed ” North-Holland Publishing Company, 1970年
P. 233
- 6) 既出2) PP. 126~127
- 7) 既出1) PP. 6~7
- 8) 吉本, 後藤, 荻野, “ 一定荷重下におけるセメントモルタルばりの破壊時間に関する二, 三の
実験 ” 材料, vol. 21, №221, 1972年2月 pp. 135~142
- 9) J.W.Murdock, “ A Critical Review of Research on Fatigue of
Plain Concrete ” T&A.M Report №638, August, 1963,
University of Illinois
- 10) 近藤, 坂監修, “ コンクリート工学ハンドブック ” 朝倉書店, P. 372
- 11) 既出1), P. 271
- 12) ヨーロッパコンクリート委員会, “ 終局強度理論による鉄筋コンクリートの設計施工基準 ”
日本セメント技術協会, パンフレット翻訳6, P. 68

表-5・1 使用セメントの物理試験結果

Specific gravity	Soundness	Flow (mm)	Fineness	Setting time	
			Specific Surface (cm ² /g)		
				Initial	Final
314	good	232	3160	hr 2 - min 00	hr 3 - min 05
Bending Strength (kg/cm ²)			Compressive Strength (kg/cm ²)		
3days	7days	28days	3days	7days	28days
338	49.6	71.1	144	231	353

表-5・2 使用骨材の物理的性質

Kind of Aggregate		Specific gravity	Water absorption (%)	Weight of unit vol (kg/m ³)	F.M.
Coarse Agg.	Crushed stone	263	1.5	1661	6.61
	Lionite	1.41	26	891	6.38
	Mesalite	1.46	17.5	815	6.53
	Ube-Keikotsu	1.57	13.0	843	6.51
Fine Agg.	River sand	260	1.2	1710	2.85
	Lionite	1.92	3.9	1381	2.95
	Mesalite	1.83	14.0	1065	2.66
	Ube-Keikotsu	1.39	11.5	1120	2.53

表-5.3 コンクリートの配合表

Specimen		W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Pozz. No. 8
Normal concrete		43.0	340	150	43.0	808	1082	C × 0.25%
Lightweight concrete	L	50.5	350	175	41.5	525	536	
	M	44.9	350	154	39.5	575	646	
	U	45.1	350	158	37.0	472	668	

表-5・4 コンクリートの強度および弾性係数

Specimen Properties of concrete	Normal conc.	Lightweight conc.		
		LC	MC	UC
Comp. strenght σ_{ul} (kg/cm^2)	453	389	420	329
modulus of elasticity E ($\times 10^5 kg/cm^2$)	3.10	1.97	2.39	1.37
Poisson's ratio μ	0.17	0.20	0.15	0.17

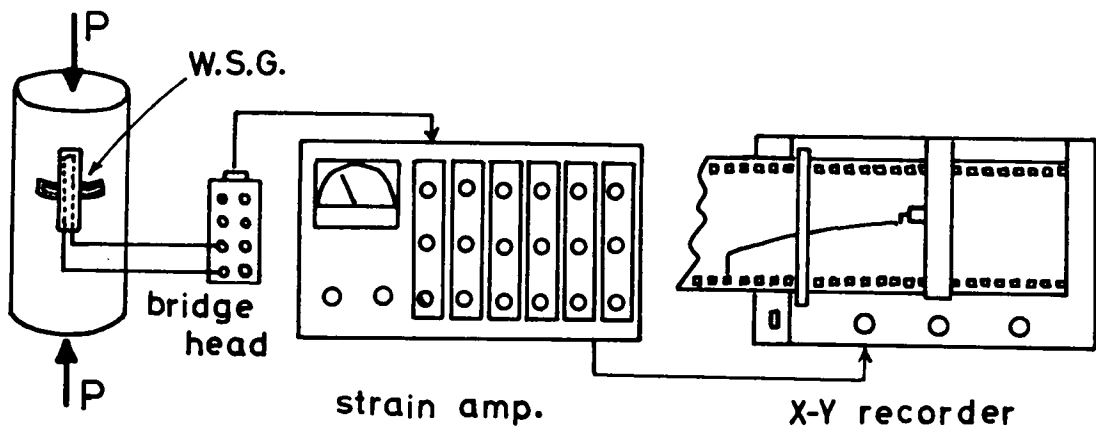


図-5・1 ひずみ測定のプロックダイアグラム

表-5・5 クリープ破壊試験結果 (Normal concrete) - その1 -

供試体 番号	導入応力 レベル S (%)	持続応力導入時の 初期弾性ひずみ ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)		試験終了時または破 壊時のクリープひずみ f ($\times 10^{-6}$)		荷重持続 時間または 破壊までの 時間 T (min.)	生存確率 p (%)	破 壊 非 破 壊 の 区 別
		縦 方 向	横 方 向	縦 方 向	横 方 向			
1	96	2000	720	240	400	0.67	90.9	破 壊
2	97	1160	420	640	1300	1.00	81.8	"
3	97	1140	300	420	1400	1.68	72.7	"
4	97	1080	430	720	1200	4.27	63.6	"
5	96	1820	570	490	640	6.50	54.5	"
6	96	1040	260	550	640	11.50	45.5	"
7	96	1080	300	850	1600	11.50	36.4	"
8	96	1840	710	840	2320	18.00	27.3	"
9	96	960	300	570	1700	32.00	18.2	"
10	96	880	260	630	1670	40.00	9.1	"
1	92	2300	—	140	—	2.33	90.0	破 壊
2	92	1860	770	60	—	2.83	80.0	"
3	92	1440	—	800	—	2.87	70.0	"
4	93	1910	640	320	560	9.67	60.0	"
5	92	1460	320	750	1110	10.30	50.0	"
6	93	840	280	400	300	11.00	40.0	"
7	93	1780	670	410	835	27.33	30.0	"
8	93	980	300	490	1580	34.00	20.0	"
9	92	1440	300	1480	1800	90.50	10.0	"
10	92	1930	530	720	715	112.00	—	非 破 壊
1	90	1800	—	740	—	2.40	90.0	破 壊
2	90	2100	740	680	—	3.33	80.0	"
3	90	1570	—	150	—	3.67	70.0	"
4	90	1670	—	1270	—	11.00	60.0	"
5	90	1740	700	810	—	21.00	50.0	"
6	90	2140	—	430	—	27.00	40.0	"
7	90	2000	600	480	—	87.00	30.0	"
8	90	1800	—	430	—	108.00	20.0	"
9	90	1220	260	1120	740	138.00	10.0	"
1	85	1700	—	460	—	4.40	90.9	破 壊
2	87	1650	690	660	—	6.00	81.8	"
3	87	1880	—	660	—	6.10	72.7	"
4	87	1880	—	920	—	12.58	63.6	"
5	87	1760	540	510	820	21.17	54.5	"
6	85	1680	500	470	1320	63.00	45.5	"
7	85	1560	—	440	—	77.40	36.4	"
8	87	1400	230	1060	1240	96.00	27.3	"
9	85	1800	470	620	1080	126.83	18.2	"
10	86	1840	550	1120	—	187.33	9.1	"
11	87	1480	420	400	290	99.67	/	非 破 壊
12	85	1660	440	610	430	99.00	/	"
13	85	1580	460	600	590	126.00	/	"
14	85	1420	440	410	450	140.00	/	"

表-5・6 クリープ破壊試験結果 (Normal concrete) -その2-

供試体 番号	導入応力 レベル S (%)	持続応力導入時の 初期弾性ひずみ ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)		試験終了時または破 壊時のクリープひずみ f ($\times 10^{-6}$)		荷重持 続 時間または 破壊までの 時 T (min)	生存確率 p (%)	破 壊 非破壊 の区別
		縦 方 向	横 方 向	縦 方 向	横 方 向			
1	83	1880	—	580	—	1867		破 壊
2	83	1560	520	620	—	9267		"
3	84	1760	550	1080	—	17067		"
4	83	1600	440	740	—	6200	/	非破壊
5	82	1440	360	280	—	10100	/	"
6	83	780	160	560	230	12000	/	"
7	83	1360	340	530	—	132000	/	"
8	83	1020	230	720	200	143000	/	"
9	84	1480	300	480	320	300000	/	"
1	80	1380	—	740	—	600		破 壊
2	80	1460	—	900	—	256840		"
3	81	1420	430	380	—	8300	/	非破壊
4	80	950	260	340	170	6000	/	"
5	80	1500	420	450	350	7800	/	"
6	80	1660	520	400	310	6167	/	"
7	80	1280	500	600	—	20800	/	"
8	80	840	200	520	220	21000	/	"
9	80	980	300	560	270	132000	/	"
10	80	1420	360	440	510	146000	/	"
11	79	980	220	510	350	12000	/	"
12	79	960	240	590	450	30000	/	"
13	79	1020	260	420	—	58000	/	"
14	79	880	180	620	—	132000	/	"
15	79	1000	240	350	360	150000	/	"
1	78	1080	280	480	340	77000	/	非破壊
2	77	820	230	360	—	130000	/	"
3	77	1000	120	230	—	240000	/	"
4	76	760	160	400	320	145000	/	"
5	75	840	180	410	380	20800	/	"
6	75	780	160	270	—	113000	/	"
7	75	1000	300	430	—	125000	/	"
8	73	960	200	270	300	100000	/	"
9	73	800	230	350	—	145000	/	"
10	72	980	180	240	120	124000	/	"
11	72	840	220	320	120	300000	/	"
12	71	920	140	480	—	130000	/	"
13	68	800	160	370	250	30000	/	"

表-5・7 クリープ破壊試験結果 (Lightweight concrete) - その1 -

供試体番号	導入応力レベル S (%)	持続応力導入時の初期弾性ひずみ ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)		試験終了時または破壊時のクリープひずみ f ($\times 10^{-6}$)		荷重持続時間または破壊までの時間 T (min.)	生存確率 p (%)	破壊 非破壊 の区別
		縦方向	横方向	縦方向	横方向			
1	94	2360	480	150	—	1.00	90.0	破壊
2	94	2320	570	330	—	3.00	80.0	〃
3	94	1910	380	460	170	3.50	70.0	〃
4	94	2420	540	500	690	4.00	60.0	〃
5	94	1600	320	360	240	4.20	50.0	〃
6	94	2280	550	560	190	4.67	40.0	〃
7	93	1250	310	190	70	9.67	30.0	〃
8	94	2180	460	260	—	13.33	20.0	〃
9	94	2400	540	880	110	18.50	10.0	〃
1	90	2110	—	250	—	1.30	95.5	破壊
2	90	1950	—	510	—	2.45	90.9	〃
3	90	1540	240	300	40	3.83	86.4	〃
4	90	2170	—	220	—	4.30	81.8	〃
5	90	1880	440	300	450	4.40	77.3	〃
6	90	2120	—	100	—	8.40	72.7	〃
7	91	1620	220	300	10	8.67	68.2	〃
8	90	1070	220	400	450	8.75	63.6	〃
9	90	1000	250	480	220	9.00	59.1	〃
10	90	860	200	240	420	10.17	54.5	〃
11	91	1560	340	380	300	11.55	50.0	〃
12	90	1320	310	230	25	13.33	45.5	〃
13	90	2140	—	80	—	15.60	40.9	〃
14	90	2000	—	590	—	16.80	36.4	〃
15	90	2000	—	230	—	17.40	31.8	〃
16	90	1240	270	190	45	18.25	27.3	〃
17	90	1810	—	120	—	32.10	22.7	〃
18	91	1080	220	250	220	42.00	18.2	〃
19	90	2190	—	190	—	44.70	13.6	〃
20	90	2150	—	150	—	50.40	9.1	〃
21	91	1700	280	520	90	130.00	4.5	〃
1	87.5	2250	—	430	—	2.30	91.7	破壊
2	87.5	2250	—	290	—	5.50	83.3	〃
3	87.5	2450	—	340	—	7.60	75.0	〃
4	87	1900	420	460	130	10.40	66.7	〃
5	87.5	2090	—	30	—	10.50	58.3	〃
6	87	1560	360	400	270	18.50	50.0	〃
7	87	1800	360	500	—	20.00	41.7	〃
8	88	1400	270	240	40	23.00	33.3	〃
9	88	1060	230	240	20	36.00	25.0	〃
10	87	1680	340	580	175	43.00	16.7	〃
11	88	1060	320	580	110	206.00	8.3	〃

表-5・8 クリープ破壊試験結果 (Lightweight concrete) - その2 -

供試体番号	導入応力レベル S (%)	持続応力導入時の初期弾性ひずみ ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)		試験終了時または破壊時のクリープひずみ f ($\times 10^{-6}$)		荷重持続時間または破壊までの時間 T (min.)	生存確率 p (%)	破壊の区別
		縦方向	横方向	縦方向	横方向			
1	85	2000	—	—	—	3.40	90.9	破壊
2	85	1240	290	200	90	7.58	81.8	〃
3	85	1880	—	50	—	10.20	72.7	〃
4	85	1000	210	250	—	31.00	63.6	〃
5	85	2120	—	270	—	96.00	54.5	〃
6	85	2020	—	440	—	156.30	45.5	〃
7	85	1800	320	770	150	162.33	36.4	〃
8	86	1520	240	550	250	205.00	27.3	〃
9	85	1870	—	190	—	835.60	18.2	〃
10	85	1800	—	600	—	1400.00	9.1	〃
11	86	1600	—	480	—	1220.00	/	非破壊
1	83	1840	440	2580	—	6.17		破壊
2	82	800	160	470	370	154.00		〃
3	83	1920	400	150	30	38.67	/	非破壊
4	83	1780	410	290	50	58.67	/	〃
5	83	1820	420	250	80	56.00	/	〃
6	83	1900	370	250	55	63.00	/	〃
7	83	1760	400	200	75	75.00	/	〃
8	83	1820	400	220	70	72.00	/	〃
9	83	1820	410	260	70	75.75	/	〃
10	83	1880	460	260	130	82.67	/	〃
11	82	1200	240	260	—	65.00	/	〃
12	82	1560	220	460	60	300.00	/	〃
13	82	1740	380	260	40	270.00	/	〃
1	80	800	170	210	190	140.00	/	非破壊
2	80	660	160	265	220	240.00	/	〃
3	80	800	170	240	230	340.00	/	〃
4	79	940	—	250	—	1250.00	/	〃
5	78	1030	200	270	20	150.00	/	〃
6	78.5	1080	240	220	120	86.00	/	〃
7	78	840	120	300	120	110.00	/	〃
8	77	780	—	420	—	115.00	/	〃
9	77	870	—	360	—	130.00	/	〃
10	74.5	940	140	365	125	132.00	/	〃
11	74	1080	280	250	130	125.00	/	〃
12	72	1520	200	400	20	20.00	/	〃
13	72	720	160	285	250	32.00	/	〃
14	70	1100	220	150	—	20.00	/	〃
15	67	820	—	120	—	140.00	/	〃

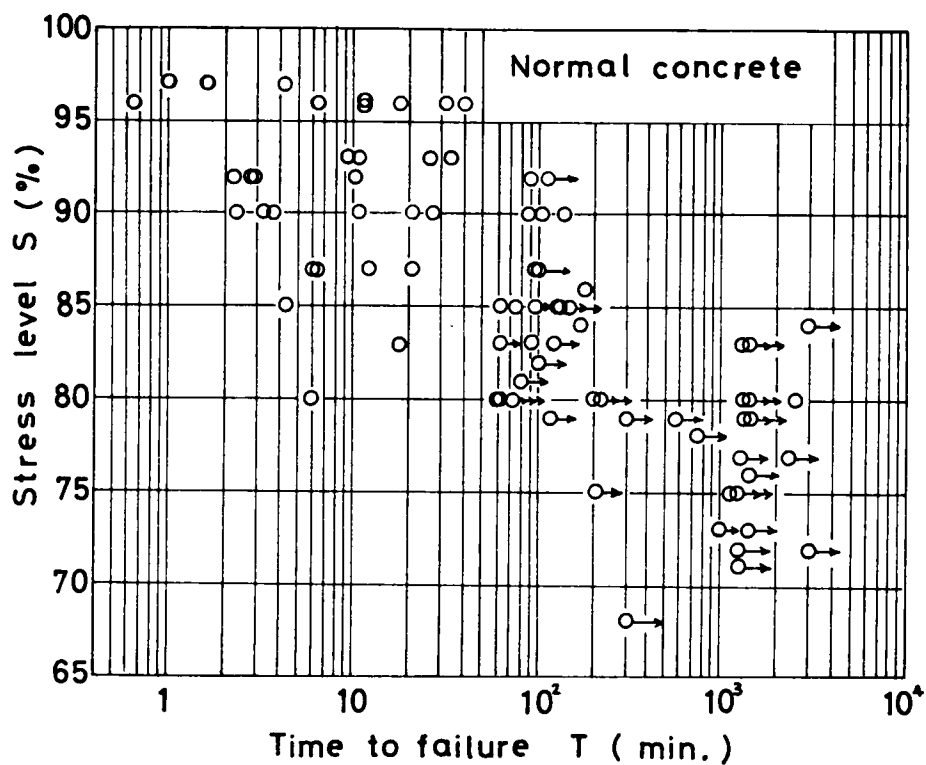


図-5・2 導入応力レベルと破壊までの時間との関係

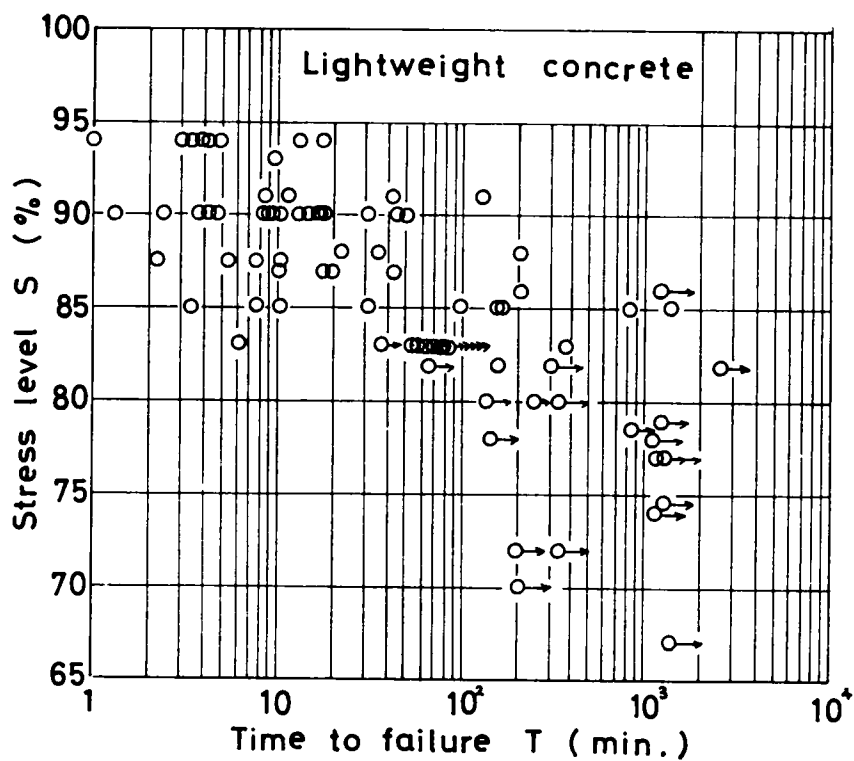


図-5・3 導入応力レベルと破壊までの時間との関係

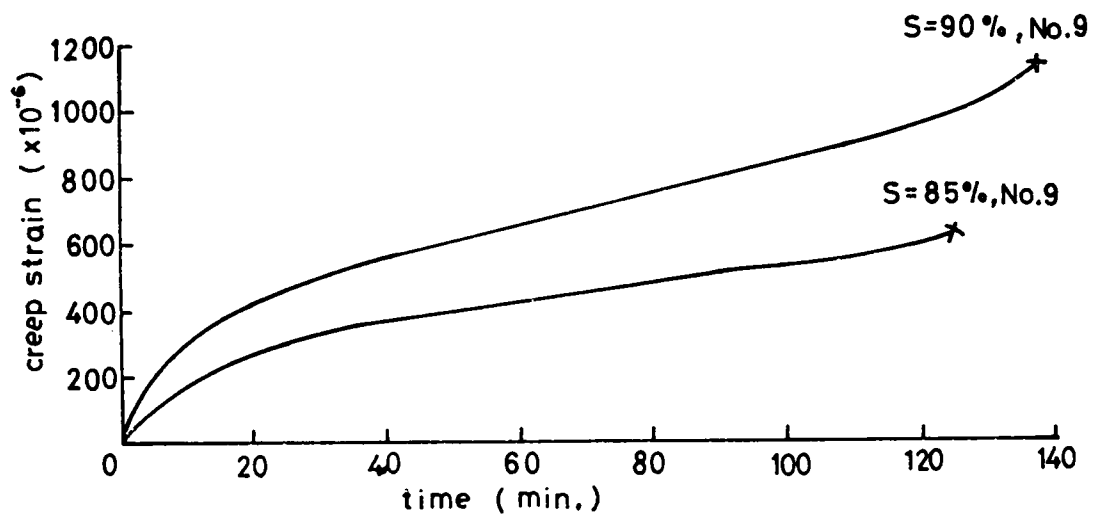
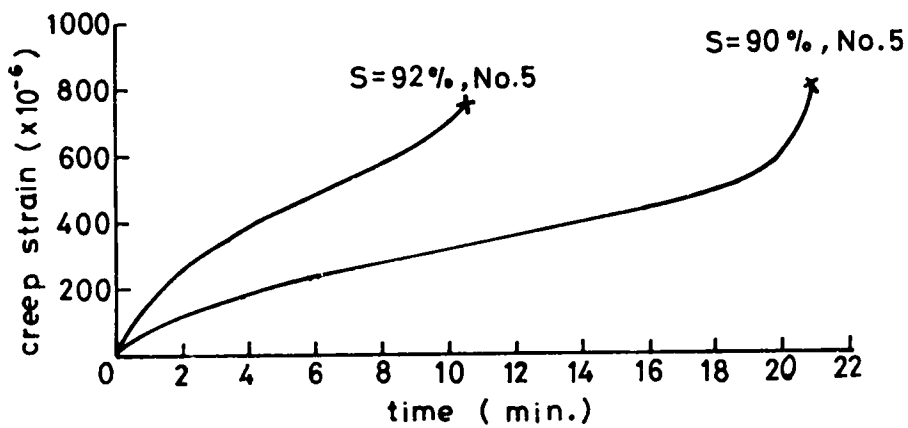
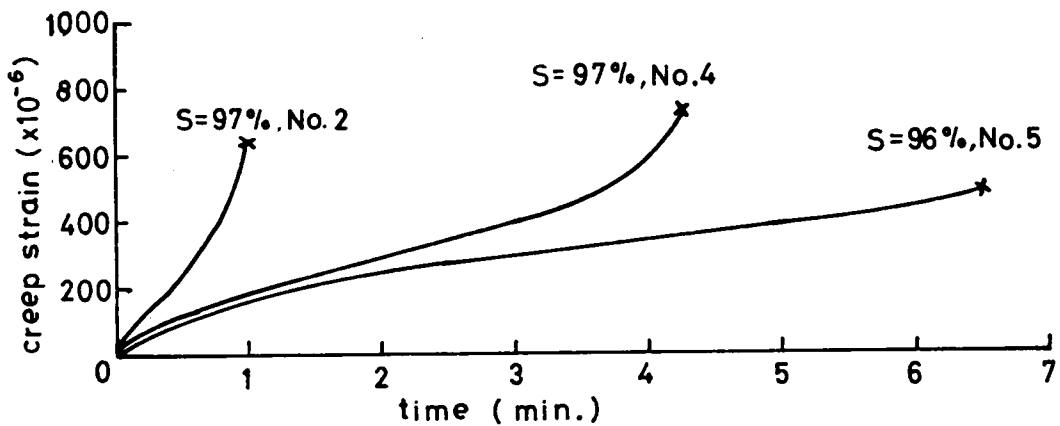


図-5・4 クリープひずみ-時間曲線 (普通コンクリート)

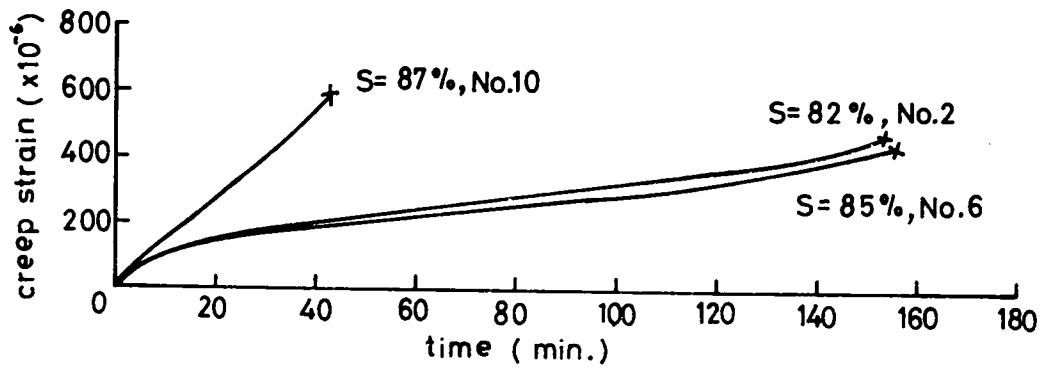
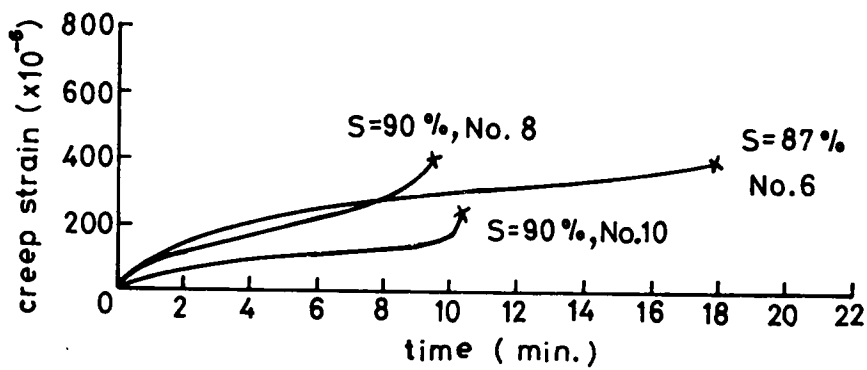
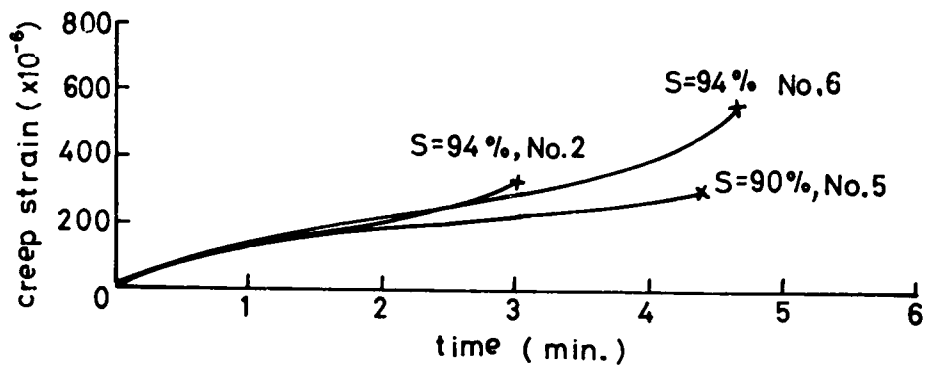


図-5・5 クリープひずみ - 時間曲線 (軽量コンクリート)

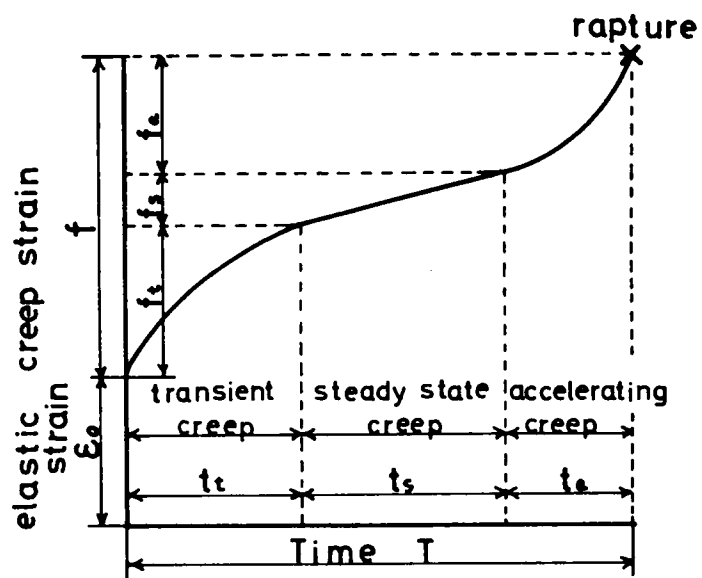


図 - 5 ・ 6 クリープ破壊曲線

表-5・9 クリープひずみ成分とひずみ速度 (Normal concrete) - その1 -

供 試 体 番 号	導 入 応 力 レ ベ ル S (%)	各クリープ段階におけるひずみ (×10 ⁻⁶)						各クリープ段階に要する時間 (min.)						定常クリープ ひずみ速度 f _s /t _s (×10 ⁻⁶ /min)	
		縦 方 向			横 方 向			縦 方 向			横 方 向				
		f _i (f _i /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	f _i (f _i /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	t _i (t _i /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)	t _i (t _i /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)		
		縦	横												
1	96	41 (0.17)	60 (0.25)	139 (0.58)	40 (0.10)	100 (0.25)	260 (0.65)	0.17 (0.25)	0.17 (0.25)	0.33 (0.50)	0.17 (0.25)	0.17 (0.25)	0.33 (0.50)	120	360
2	97	211 (0.33)	192 (0.30)	237 (0.37)	221 (0.17)	182 (0.14)	897 (0.69)	0.38 (0.38)	0.46 (0.46)	0.16 (0.16)	0.31 (0.31)	0.31 (0.31)	0.38 (0.38)	320	500
3	97	151 (0.36)	118 (0.28)	151 (0.36)	154 (0.11)	112 (0.08)	1134 (0.81)	0.55 (0.33)	0.64 (0.38)	0.49 (0.29)	0.49 (0.29)	0.40 (0.24)	0.79 (0.47)	188	300
4	97	238 (0.33)	180 (0.25)	302 (0.42)	192 (0.16)	228 (0.19)	780 (0.65)	1.54 (0.36)	1.54 (0.36)	1.20 (0.28)	1.20 (0.28)	1.54 (0.36)	1.54 (0.36)	100	150
5	96	250 (0.51)	171 (0.35)	69 (0.14)	333 (0.52)	218 (0.34)	89 (0.14)	2.02 (0.31)	3.51 (0.54)	0.98 (0.15)	2.28 (0.35)	3.25 (0.50)	0.98 (0.15)	486	956
6	96	313 (0.57)	154 (0.28)	83 (0.15)	282 (0.44)	128 (0.20)	230 (0.36)	4.49 (0.39)	4.95 (0.43)	2.07 (0.18)	4.49 (0.39)	2.99 (0.26)	4.03 (0.35)	60	867
7	96	434 (0.51)	102 (0.12)	314 (0.37)	352 (0.22)	160 (0.10)	1088 (0.68)	5.52 (0.48)	2.53 (0.22)	3.45 (0.30)	4.03 (0.35)	2.99 (0.26)	4.49 (0.89)	40	57
8	96	353 (0.42)	269 (0.32)	218 (0.26)	—	—	—	3.96 (0.22)	7.92 (0.44)	6.12 (0.34)	—	—	—	338	—
9	96	354 (0.62)	125 (0.22)	91 (0.16)	357 (0.21)	255 (0.15)	1088 (0.64)	12.16 (0.38)	14.08 (0.44)	5.76 (0.18)	8.00 (0.25)	9.92 (0.31)	14.08 (0.44)	86	29
10	96	239 (0.38)	152 (0.24)	239 (0.38)	484 (0.29)	184 (0.11)	1002 (0.60)	16.00 (0.40)	11.20 (0.28)	12.80 (0.32)	14.00 (0.35)	14.00 (0.35)	12.00 (0.30)	1.3	10
1	92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	92	144 (0.18)	88 (0.11)	568 (0.71)	—	—	—	0.83 (0.29)	0.83 (0.29)	1.21 (0.42)	—	—	—	107	—
4	93	—	—	—	319 (0.57)	168 (0.30)	73 (0.13)	—	—	—	3.96 (0.41)	3.96 (0.41)	1.74 (0.18)	—	410
5	92	450 (0.60)	173 (0.23)	127 (0.17)	156 (0.14)	255 (0.23)	699 (0.63)	4.43 (0.43)	3.09 (0.30)	2.73 (0.27)	2.27 (0.22)	3.61 (0.35)	4.43 (0.43)	457	65
6	93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	93	338 (0.69)	113 (0.23)	39 (0.08)	395 (0.25)	126 (0.08)	1059 (0.67)	15.98 (0.47)	15.98 (0.47)	2.04 (0.06)	9.86 (0.29)	6.12 (0.18)	18.02 (0.53)	75	5
9	92	755 (0.51)	429 (0.29)	296 (0.20)	720 (0.40)	36 (0.02)	1044 (0.58)	25.34 (0.28)	50.68 (0.56)	14.48 (0.16)	35.30 (0.39)	19.91 (0.22)	35.30 (0.39)	84	115
1	90	126 (0.17)	104 (0.14)	510 (0.69)	—	—	—	0.67 (0.28)	0.94 (0.39)	0.79 (0.33)	—	—	—	110	—
2	90	258 (0.38)	163 (0.24)	327 (0.48)	—	—	—	1.33 (0.40)	1.00 (0.30)	1.00 (0.30)	—	—	—	160	—
3	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	90	394 (0.31)	114 (0.09)	762 (0.60)	—	—	—	2.97 (0.27)	3.96 (0.36)	4.07 (0.37)	—	—	—	30	—
5	90	243 (0.30)	202 (0.25)	365 (0.45)	—	—	—	14.50 (0.29)	24.00 (0.48)	11.50 (0.23)	—	—	—	20	—
6	90	284 (0.66)	60 (0.14)	86 (0.20)	—	—	—	4.86 (0.18)	5.13 (0.19)	17.00 (0.63)	—	—	—	115	—
7	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	90	571 (0.51)	325 (0.29)	224 (0.20)	282 (0.38)	229 (0.31)	229 (0.31)	40.00 (0.29)	59.30 (0.43)	38.60 (0.28)	40.00 (0.29)	70.40 (0.51)	27.60 (0.20)	53	33

表-5・10 クリープひずみ成分とひずみ速度 (Normal concrete) - その2 -

供試 体 番 号	導入 応力 レベル S (%)	各クリープ段階におけるひずみ(×10 ⁻⁶)						各クリープ段階に要する時間(min.)						定常ク リープひ ずみ速度 f _s /t _s (×10 ⁻⁶ /min.)	
		縦 方 向			横 方 向			縦 方 向			横 方 向				
		f _i (f _i /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	f _i (f _i /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	t _i (t _i /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)	t _i (t _i /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)	縦	横
1	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	87	231 (035)	139 (021)	290 (044)	—	—	—	198 (033)	270 (045)	132 (022)	—	—	—	524	—
3	87	317 (048)	218 (033)	125 (019)	—	—	—	201 (033)	299 (049)	110 (018)	—	—	—	733	—
4	87	478 (052)	129 (014)	313 (034)	—	—	—	579 (046)	289 (023)	390 (031)	—	—	—	433	—
5	87	—	—	—	443 (054)	115 (014)	262 (032)	—	—	—	699 (033)	910 (043)	508 (024)	—	239
6	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	85	242 (055)	123 (028)	75 (017)	—	—	—	1084 (014)	2941 (038)	3715 (048)	—	—	—	35	—
8	87	594 (056)	392 (037)	74 (007)	297 (024)	335 (027)	608 (049)	3264 (034)	5280 (055)	1056 (011)	2016 (021)	4032 (042)	3552 (037)	74	121
9	85	378 (061)	143 (023)	99 (016)	475 (044)	270 (025)	335 (031)	3551 (028)	5961 (047)	3171 (025)	3551 (028)	5961 (047)	3171 (025)	23	45
10	86	773 (069)	224 (020)	123 (011)	—	—	—	5995 (032)	5995 (032)	6744 (036)	—	—	—	37	—
1	83	348 (060)	174 (030)	58 (010)	—	—	—	597 (032)	765 (041)	504 (027)	—	—	—	190	—
2	83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	80	244 (033)	133 (018)	363 (049)	—	—	—	192 (032)	192 (032)	216 (036)	—	—	—	650	—
2	80	486 (054)	198 (022)	216 (024)	—	—	—	90821 (012)	64210 (025)	161809 (063)	—	—	—	031	—

表-5・11 クリープひずみ成分とひずみ速度 (Lightweight concrete) - その1 -

供試体番号	導入応力レベル S (%)	各クリープ段階におけるひずみ (×10 ⁻⁶)						各クリープ段階に要する時間 (min)						定常クリープひずみ速度 f _s /t _s (×10 ⁶ /min)	
		縦 方 向			横 方 向			縦 方 向			横 方 向				
		f _i (f _i /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	f _i (f _i /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	t _i (t _i /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)	t _i (t _i /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)	縦	横
1	94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	94	159 (048)	59 (018)	112 (034)	—	—	—	132 (044)	099 (033)	069 (029)	—	—	—	600	—
3	94	207 (045)	41 (009)	212 (046)	70 (041)	41 (024)	59 (035)	098 (028)	126 (036)	126 (036)	102 (029)	147 (042)	102 (029)	725	320
4	94	310 (062)	140 (028)	50 (010)	—	—	—	128 (032)	204 (051)	068 (017)	—	—	—	667	—
5	94	140 (039)	130 (036)	90 (025)	70 (029)	60 (025)	110 (046)	122 (029)	239 (057)	059 (014)	122 (029)	160 (038)	139 (033)	540	375
6	94	202 (036)	89 (016)	269 (048)	110 (058)	21 (011)	59 (031)	168 (036)	131 (028)	168 (036)	201 (043)	131 (028)	135 (029)	677	150
7	93	—	—	—	30 (043)	25 (035)	15 (021)	—	—	—	134 (019)	551 (057)	232 (024)	—	40
8	94	151 (058)	49 (019)	60 (023)	—	—	—	507 (038)	507 (038)	320 (024)	—	—	—	100	—
9	94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表-5・12 クリープひずみ成分とひずみ速度 (Lightweight concrete)-その2-

供試 体番 号	導入 応力 レベル S (%)	各クリープ段階におけるひずみ(×10 ⁻⁶)						各クリープ段階に要する時間 (min.)						定常クリ ープひず み速度 f _s / t _s (×10 ⁻⁶ /min)	
		縦 方 向			横 方 向			縦 方 向			横 方 向				
		f _t (f _t /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	f _t (f _t /f)	f _s (f _s /f)	f _a (f _a /f)	t _t (t _t /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)	t _t (t _t /T)	t _s (t _s /T)	t _a (t _a /T)		
		縦	横		縦	横		縦	横		縦	横			
1	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	90	120 (0.40)	39 (0.13)	41 (0.47)	—	—	—	161 (0.42)	123 (0.32)	100 (0.26)	—	—	—	256	—
4	90	42 (0.19)	59 (0.27)	119 (0.54)	—	—	—	099 (0.23)	185 (0.43)	145 (0.34)	—	—	—	332	—
5	90	159 (0.53)	90 (0.30)	51 (0.17)	103 (0.23)	81 (0.18)	266 (0.59)	167 (0.38)	123 (0.28)	158 (0.36)	123 (0.28)	123 (0.28)	194 (0.44)	750	667
6	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	91	210 (0.70)	51 (0.17)	39 (0.13)	—	—	—	390 (0.45)	355 (0.41)	121 (0.14)	—	—	—	139	—
8	90	132 (0.33)	132 (0.33)	56 (0.14)	72 (0.16)	22 (0.05)	356 (0.09)	315 (0.36)	490 (0.56)	070 (0.08)	228 (0.26)	131 (0.15)	516 (0.59)	296	167
9	90	235 (0.49)	115 (0.24)	130 (0.27)	57 (0.26)	70 (0.32)	93 (0.42)	315 (0.35)	468 (0.52)	117 (0.13)	315 (0.35)	387 (0.43)	198 (0.22)	11.4	450
10	90	101 (0.42)	50 (0.21)	89 (0.37)	114 (0.27)	50 (0.12)	256 (0.61)	397 (0.39)	478 (0.47)	142 (0.14)	315 (0.31)	244 (0.24)	458 (0.45)	313	208
11	91	175 (0.46)	144 (0.38)	61 (0.16)	66 (0.22)	51 (0.17)	183 (0.61)	300 (0.26)	601 (0.52)	254 (0.22)	300 (0.26)	497 (0.43)	358 (0.31)	250	100
12	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	90	120 (0.63)	55 (0.29)	15 (0.08)	—	—	—	602 (0.33)	1022 (0.56)	201 (0.11)	—	—	—	55	—
17	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	91	140 (0.56)	70 (0.28)	40 (0.16)	95 (0.43)	79 (0.36)	46 (0.21)	1050 (0.25)	2100 (0.50)	1050 (0.25)	1470 (0.35)	2100 (0.50)	630 (0.15)	35	24
19	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	91	281 (0.54)	198 (0.38)	41 (0.08)	—	—	—	2990 (0.23)	8840 (0.68)	1170 (0.09)	—	—	—	22	—

表-5・13 クリープひずみ成分とひずみ速度 (Lightweight concrete) - その3 -

供試体番号	導入応力 レベル S (%)	各クリープ段階におけるひずみ ($\times 10^{-6}$)						各クリープ段階に要する時間 (min.)						定常クリープひずみ速度 f_s/t_s ($\times 10^{-6}/min$)	
		縦 方 向			横 方 向			縦 方 向			横 方 向			縦	横
		f_t (f_t/f)	f_s (f_s/f)	f_a (f_a/f)	f_t (f_t/f)	f_s (f_s/f)	f_a (f_a/f)	t_t (t_t/T)	t_s (t_s/T)	t_a (t_a/T)	t_t (t_t/T)	t_s (t_s/T)	t_a (t_a/T)		
1	87.5	90 (021)	142 (033)	198 (046)	-	-	-	067 (029)	131 (057)	032 (014)	-	-	-	1053	-
2	87.5	72 (025)	87 (030)	131 (045)	-	-	-	132 (024)	231 (042)	196 (032)	-	-	-	376	-
3	87.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	87	253 (055)	97 (021)	110 (024)	70 (054)	20 (015)	40 (031)	291 (028)	572 (055)	177 (017)	291 (028)	572 (055)	177 (017)	125	25
5	87.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	87	244 (061)	76 (019)	80 (020)	70 (026)	84 (031)	116 (043)	592 (032)	592 (032)	666 (036)	389 (021)	777 (042)	685 (037)	125	106
7	87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	88	180 (075)	46 (019)	14 (006)	-	-	-	989 (043)	1104 (048)	207 (009)	-	-	-	41	-
9	88	139 (058)	31 (013)	70 (029)	-	-	-	1584 (044)	1404 (039)	612 (017)	-	-	-	21	-
10	87	360 (062)	127 (022)	93 (016)	103 (059)	61 (035)	106 (006)	1720 (040)	1849 (043)	731 (017)	1591 (037)	2322 (054)	387 (009)	87	32
11	88	188 (079)	58 (010)	64 (011)	85 (077)	5 (005)	20 (018)	10094 (049)	5974 (029)	4944 (024)	5974 (029)	10094 (049)	4944 (024)	40	-
1	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	85	126 (063)	36 (018)	38 (019)	69 (077)	7 (008)	14 (015)	356 (047)	280 (037)	121 (016)	402 (053)	318 (042)	038 (005)	125	22
3	85	25 (049)	16 (033)	9 (018)	-	-	-	1091 (015)	1963 (027)	4217 (058)	-	-	-	60	-
4	85	140 (056)	60 (024)	50 (020)	-	-	-	992 (032)	1612 (052)	496 (016)	-	-	-	37	-
5	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	85	158 (036)	57 (013)	225 (051)	-	-	-	2032 (013)	8909 (057)	4689 (030)	-	-	-	07	-
7	85	462 (060)	254 (033)	54 (007)	84 (056)	28 (019)	38 (025)	5032 (031)	10227 (063)	974 (006)	6169 (038)	9253 (056)	974 (006)	23	33
8	86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	82	221 (047)	141 (030)	108 (023)	104 (028)	118 (032)	148 (040)	5082 (033)	7238 (047)	3080 (020)	4158 (027)	8162 (053)	308 (020)	23	14

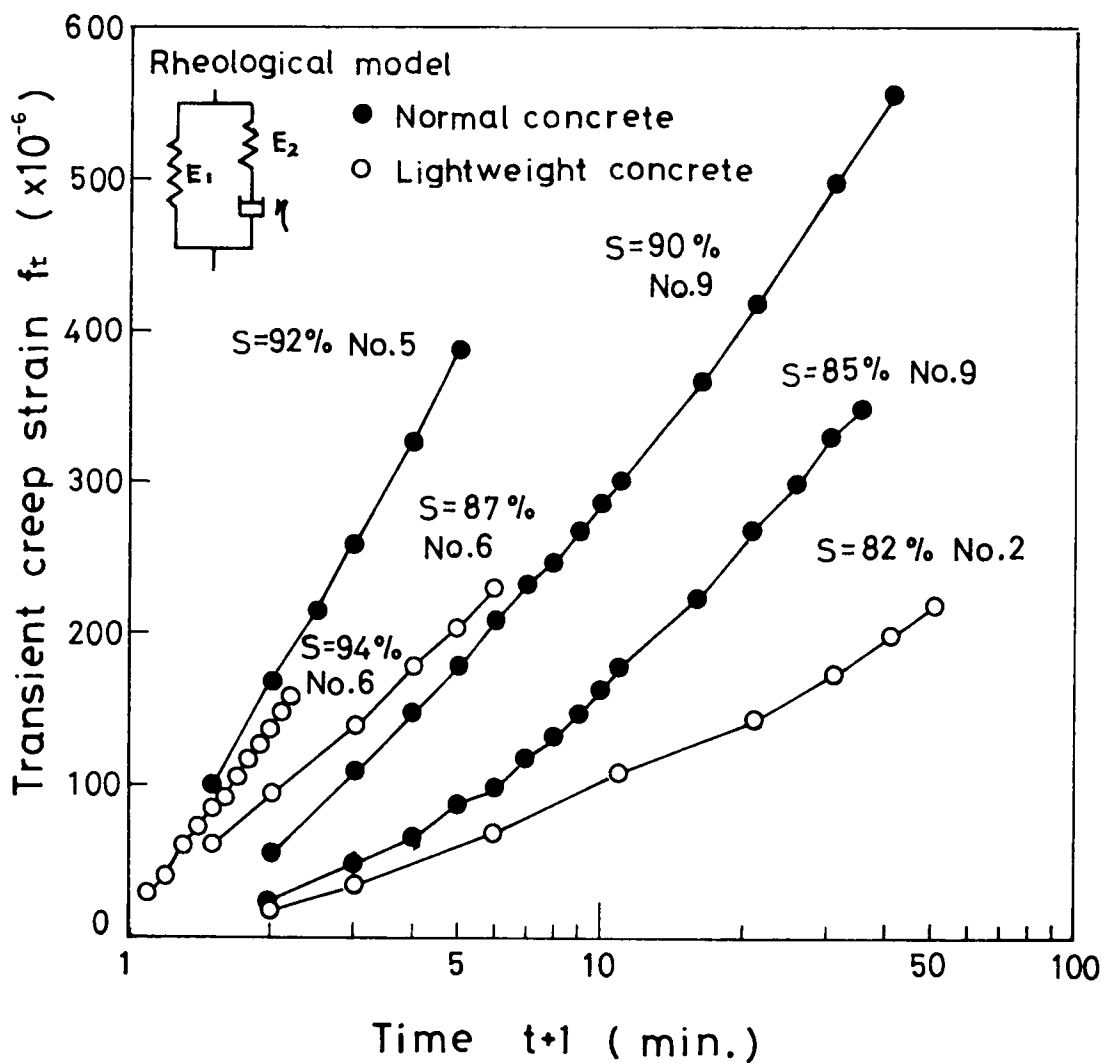


図-5・7 遷移クリープひずみと時間との関係

表-5・14 クリープひずみ成分

	Normal concrete				Lightweight concrete			
	Strain		Time		Strain		Time	
	vert.	hori.	vert.	hori.	vert.	hori.	vert.	hori.
Transient creep	0.46	0.30	0.32	0.31	0.51	0.41	0.33	0.32
Steady state creep	0.23	0.19	0.38	0.34	0.24	0.28	0.45	0.42
Accelerating creep	0.31	0.51	0.30	0.35	0.25	0.38	0.22	0.26

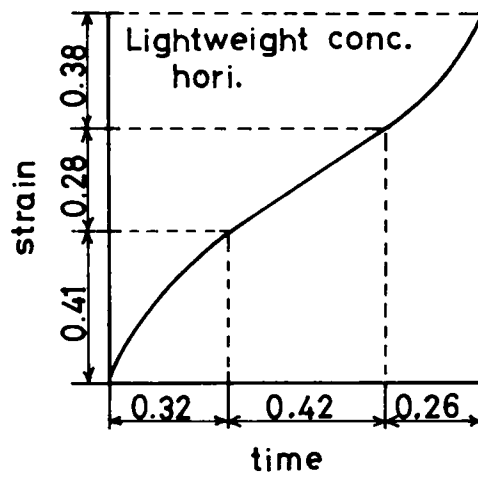
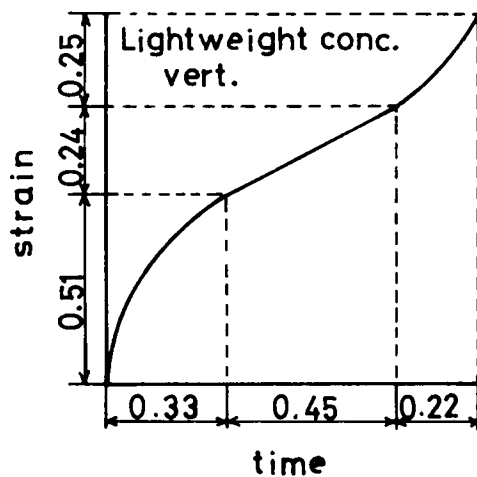
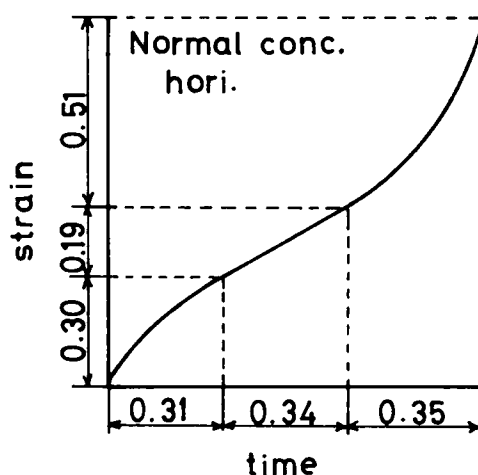
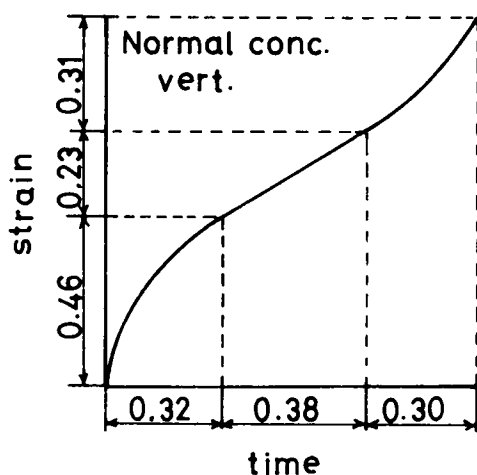


図-5・8 クリープひずみ - 時間曲線

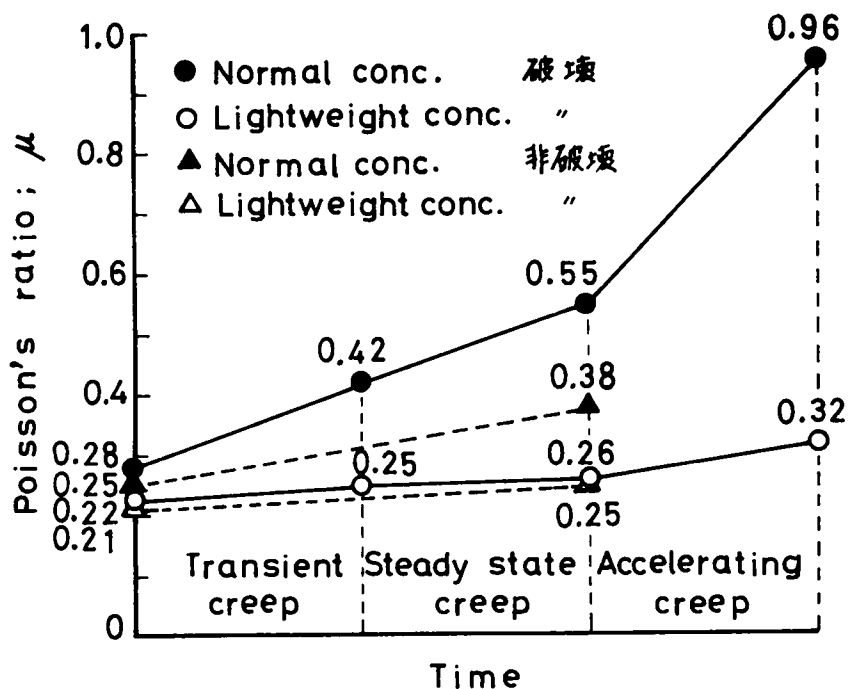


図-5・9 各クリープ段階における横ひずみと縦ひずみの比

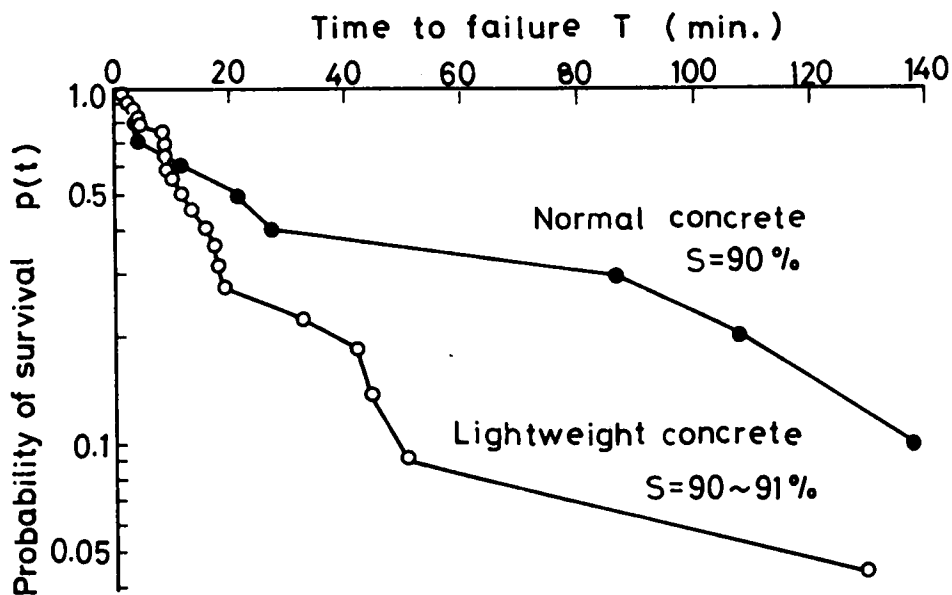


図-5・10 破壊に要する時間の分布

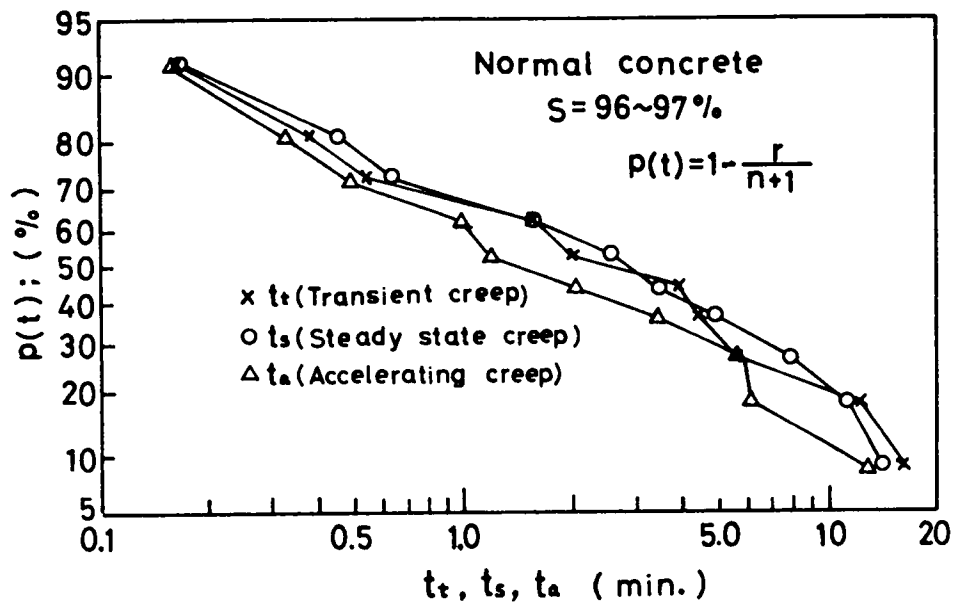


図-5・11 各クリープ段階に要する時間の分布

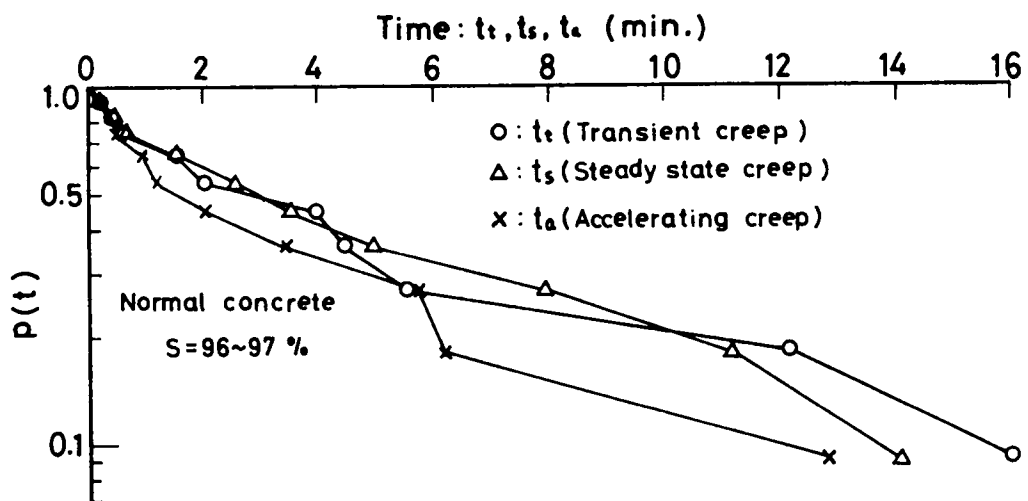


図-5・12 各クリープ段階に要する時間の分布

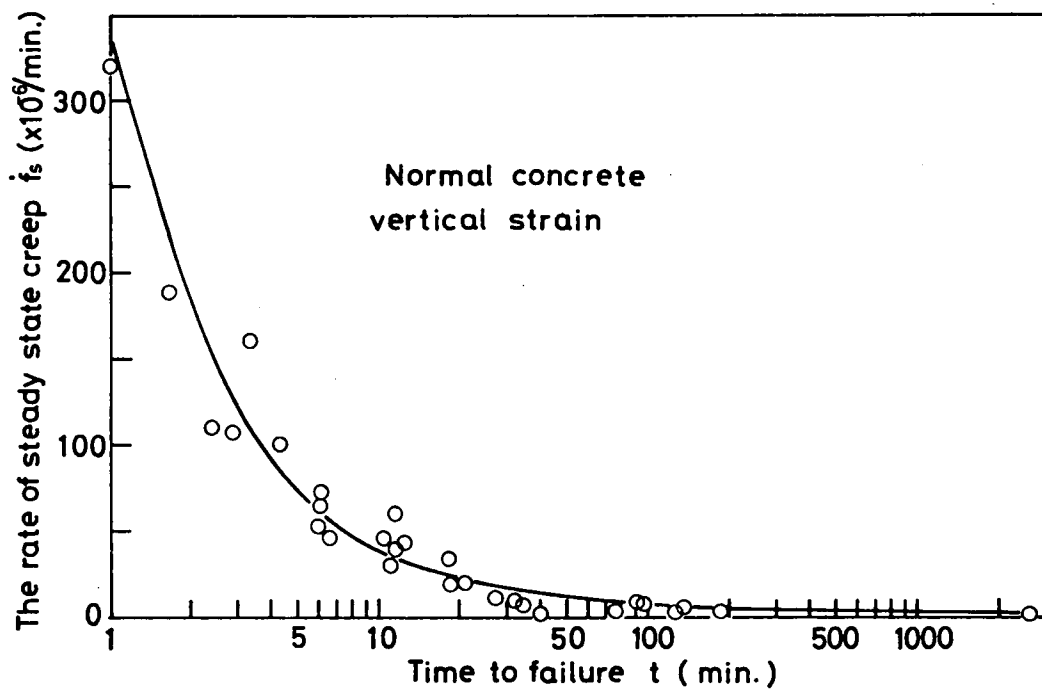


図-5・13 定常クリープ速度と破壊までの時間との関係

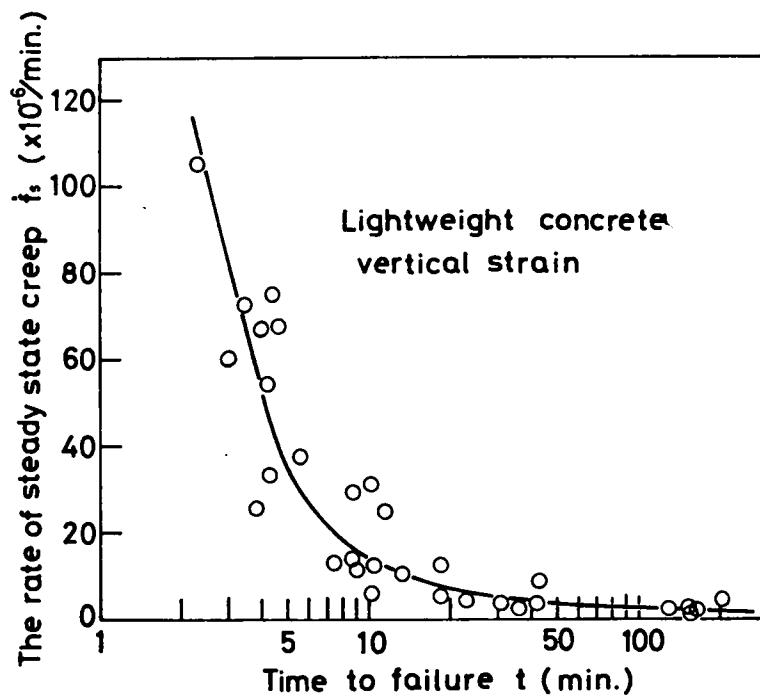


図-5・14 定常クリープ速度と破壊までの時間との関係

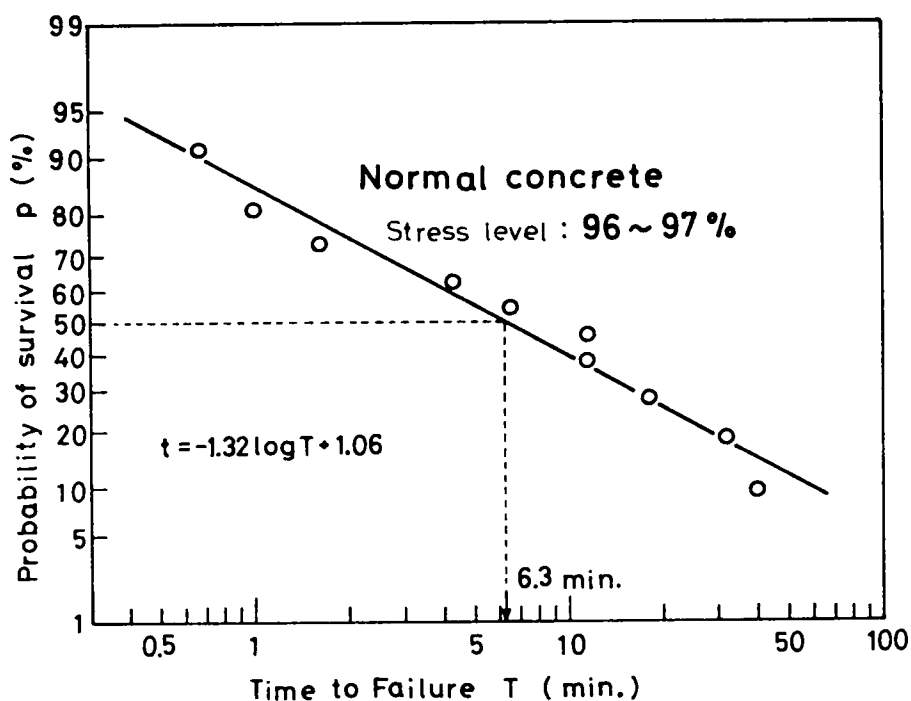


図-5・15 破壊に要する時間の分布

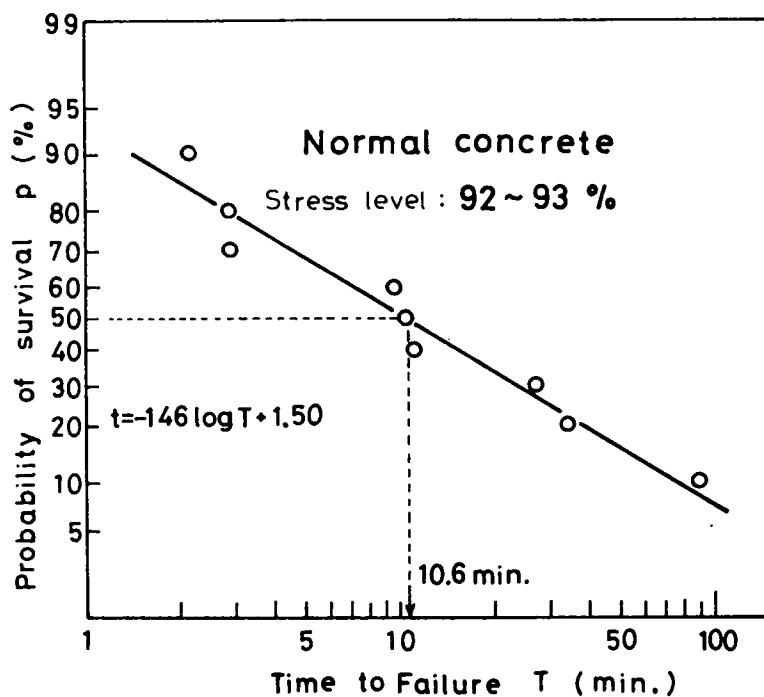


図-5・16 破壊に要する時間の分布

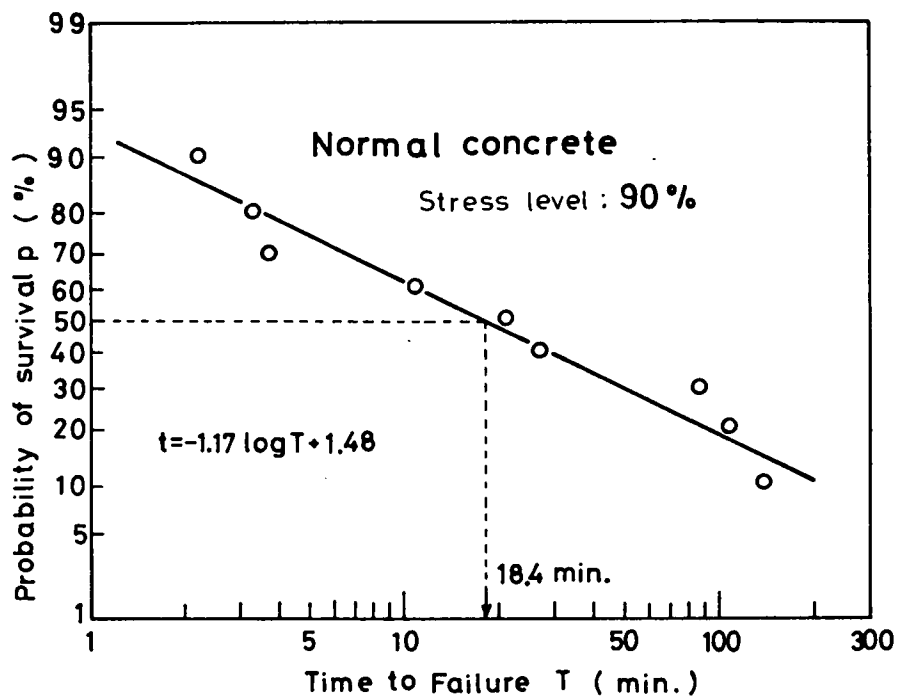


図 - 5 ・ 1 7 破壊に要する時間の分布

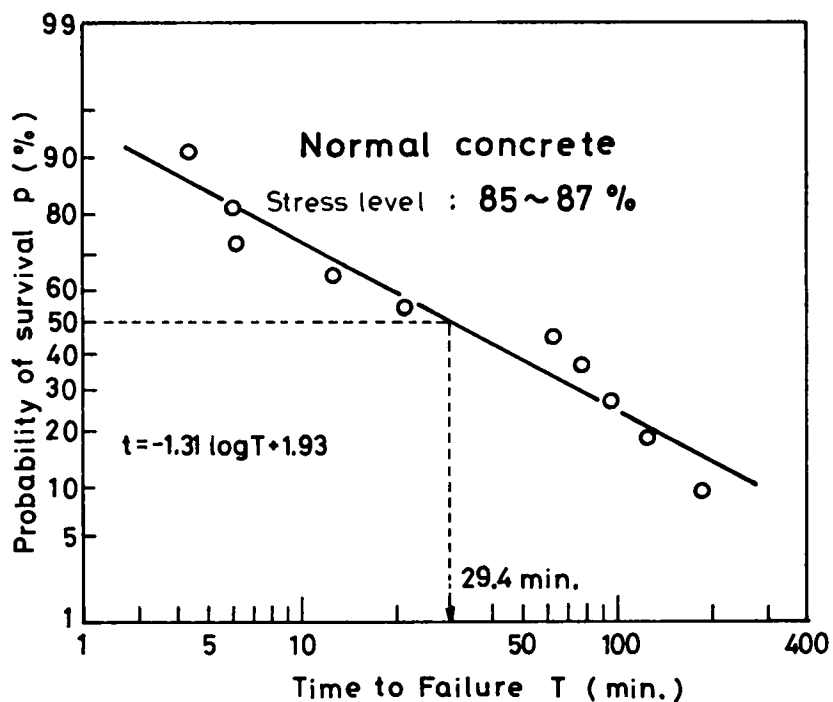


図 - 5 ・ 1 8 破壊に要する時間の分布

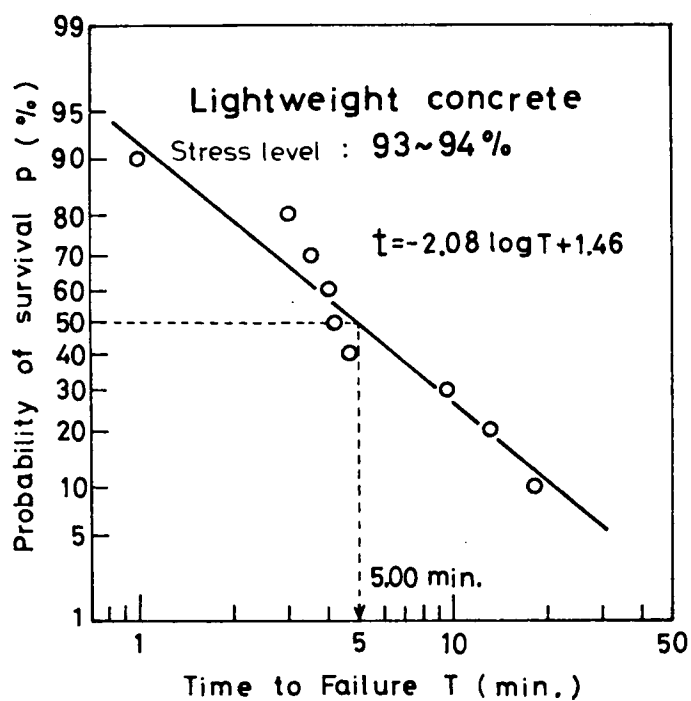


図-5・19 破壊に要する時間の分布

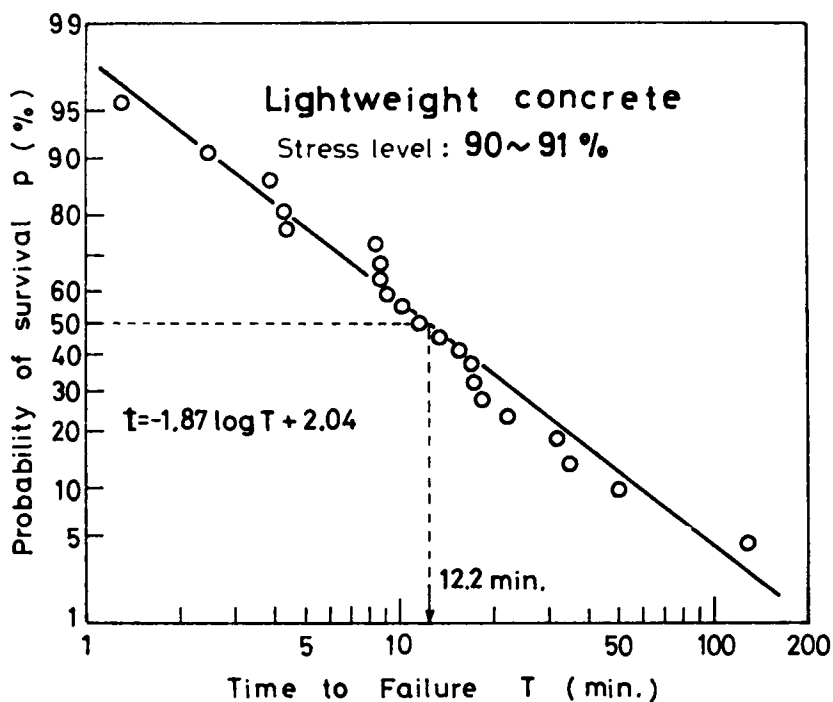


図-5・20 破壊に要する時間の分布

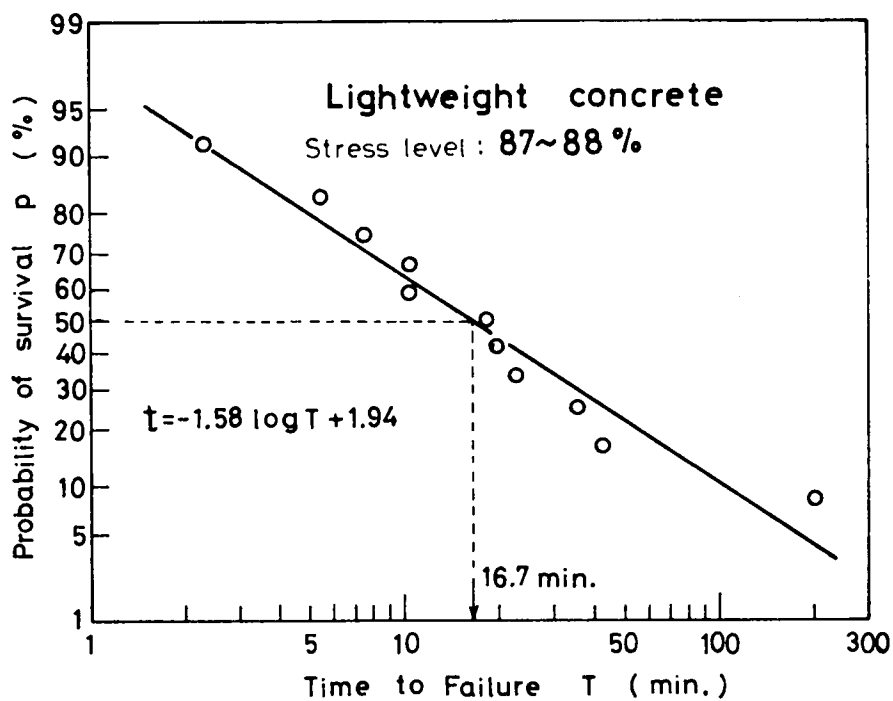


図- 5 ・ 2 1 破壊に要する時間の分布

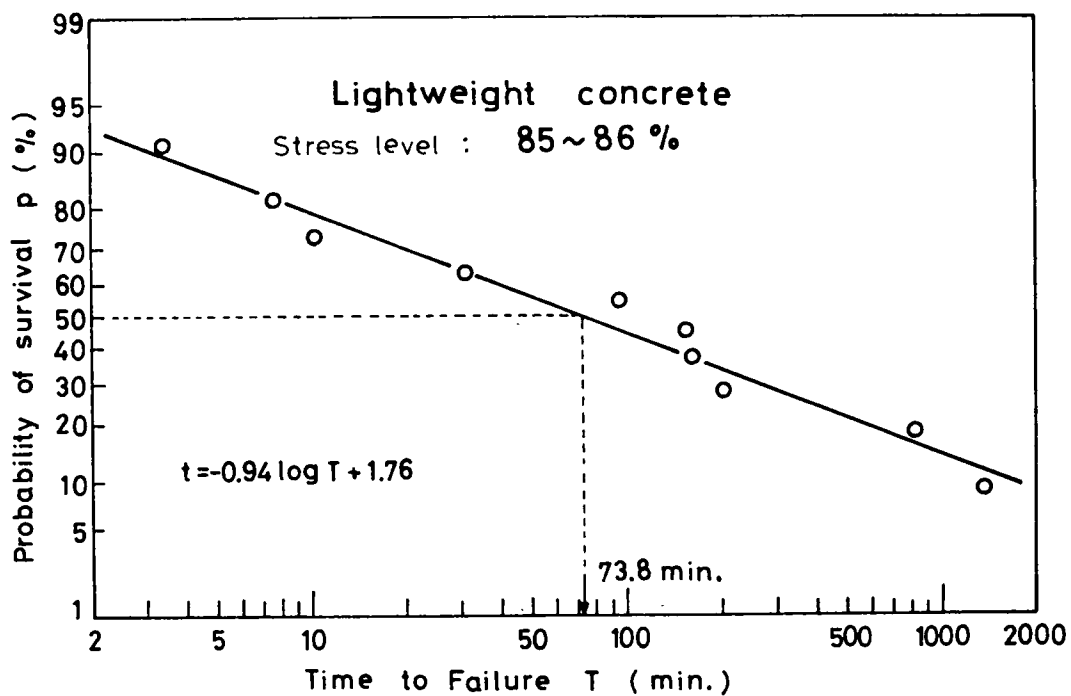
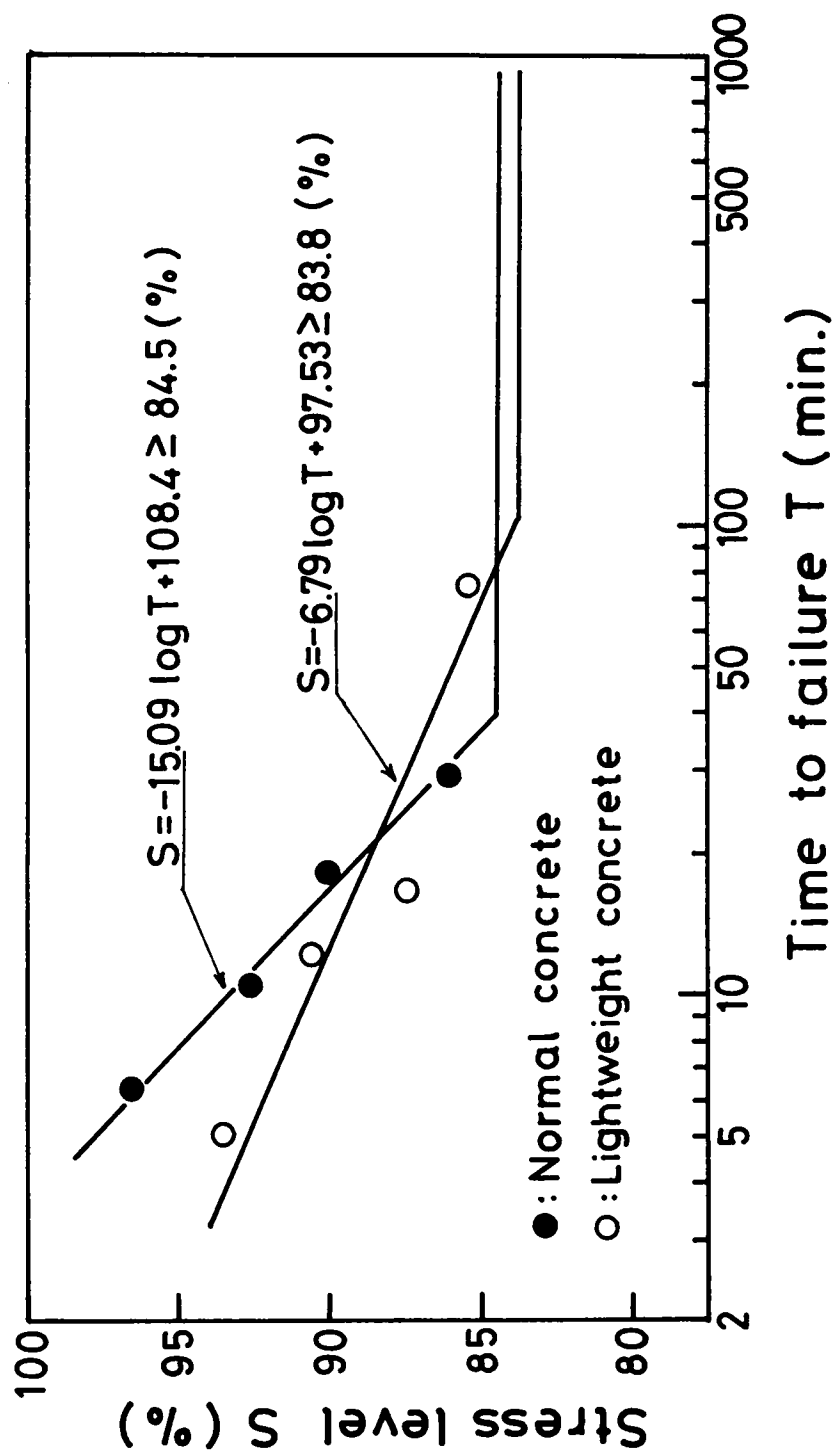


図- 5 ・ 2 2 破壊に要する時間の分布



図一五・二三 応力レベルと平均破壊時間との関係

表-5・15 平均クリープ限の決定

	Stress level	Total	Survival	Pro.of survival
N.C	90 ~ 93 %	19	1	5.26 %
	85 ~ 87 %	14	4	28.57 %
	82 ~ 84 %	9	6	66.67 %
	79 ~ 81 %	15	13	86.67 %
L.C	85 ~ 86 %	11	1	9.09 %
	82 ~ 83 %	13	11	84.61 %

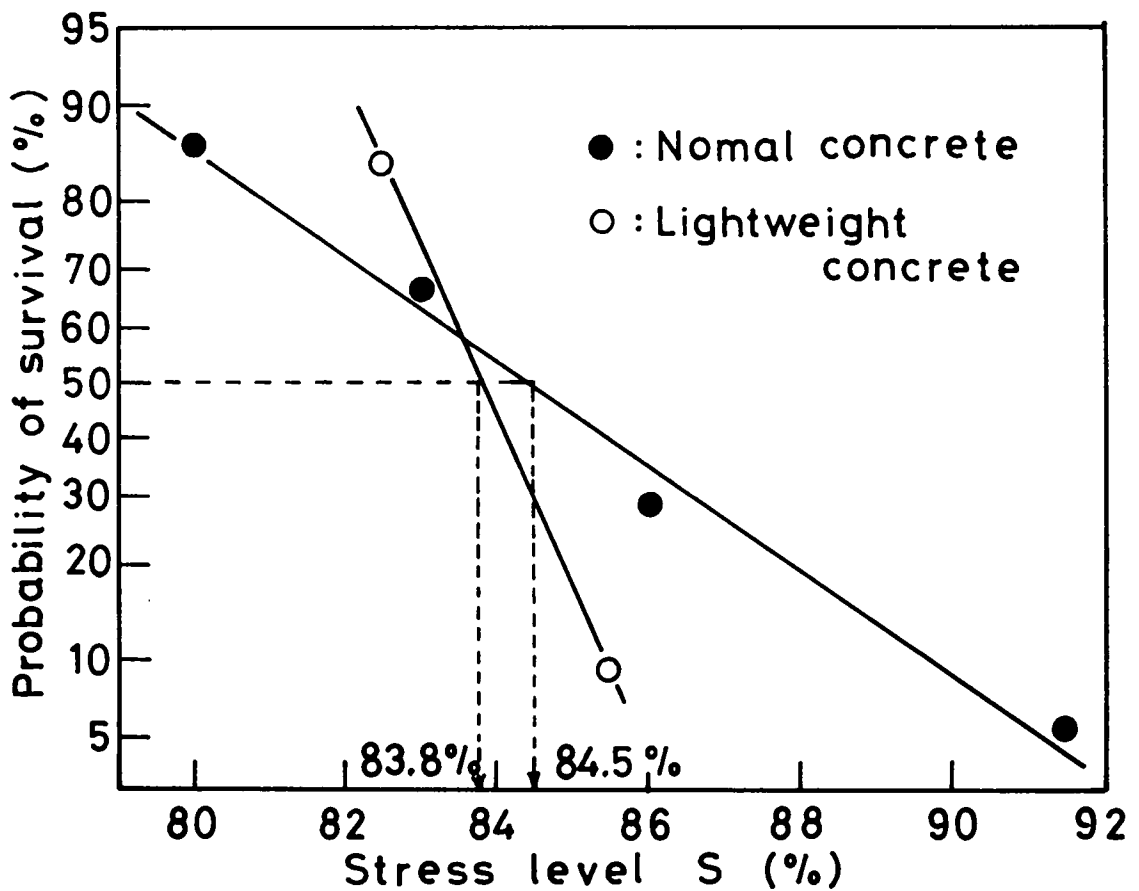


図-5・24 平均クリープ限の決定

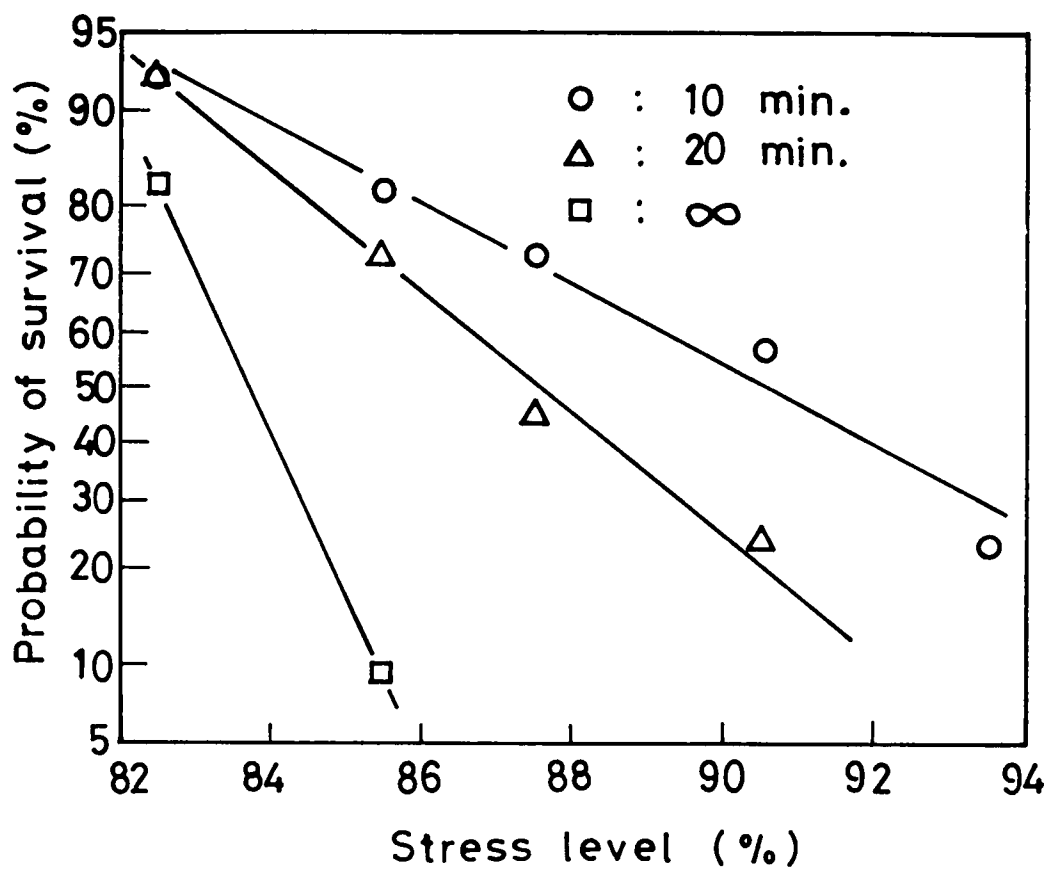


図 - 5 - 25

第6章 高サイクル繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労現象に関する研究

6.1 概説と研究目的

静的強度以下の繰返し荷重によっておこる材料の破壊を疲労あるいは疲労破壊といい、金属材料では古くから知られている重要な性質である。コンクリートにもこのような性質の存在することが今世紀になって明らかにされて以来、この種疲労の問題が研究されるようになってきた。しかしながら、コンクリートの疲労に関する研究は、コンクリートの他の一般的な性質に関する研究と比較して、その数はきわめて少ないように思われる。また従来のコンクリートの疲労に関する研究の多くは鉄筋コンクリート桁およびプレストレストコンクリート桁の曲げ疲労に関するもので、プレーンコンクリートの圧縮疲労に関するものはさらに少ないのが現状である。

土木学会のコンクリート標準示方書においても、鉄筋の許容応力を決定する際のみ繰返し荷重の影響が考慮されているだけで、コンクリートそのものの疲労の影響についてはなんら考慮されていない。

一般に、コンクリートに作用する繰返し荷重には、橋梁、高架高速道路・鉄道のコンクリート桁およびスラブならびにコンクリートまくらぎなどに対する走行荷重や各種機械の基礎に対する振動荷重などが考えられる。最近の列車の運行回数および自動車交通量の急激な増加の現状を考えると、コンクリート構造物に繰返し荷重が作用する機会がますます多くなり、そのため繰返し荷重下におけるコンクリートの挙動に関する正しい知識が要求されていると思われる。

本研究は、コンクリートの疲労性状を正しく把握するため、その基礎となるコンクリートの圧縮疲労特性を明らかにすることに主眼点をおき、さらに最近土木構造物の構造主体として用いられる機会の多くなった軽量コンクリートの圧縮疲労試験を行ない、普通コンクリートの疲労特性との相違点に対して若干の考察を加えたものである。さらに、前章で論じた持続荷重下におけるコンクリートの変形、破壊特性との比較において、繰返し荷重下におけるコンクリートの変形、破壊特性についても言及するつもりである。

コンクリートの静的強度や疲労寿命などの特性値は、金属材料のそれらと比較して著しくばらつくことがみとめられている。従来行なわれたコンクリートの疲労に関する研究においては、このような特性値のばらつきに関して適切な処置がとられていないように思われる。そこで本研究においては、コンクリートの疲労に関する性質は、本来確率統計的な性質であるとの観点に立ち、実験結果を取扱う際には後述するようなすでに金属材料の疲労の問題に関して古くから用いられている統計的な手法を用いて処理することにした。

6.2 疲労試験における統計的処理法

同一条件のもとで行なった疲労試験であっても、その疲労寿命（ N ）がかなりばらつくことは従来の研究においても指摘されていることである。

一般に、実験によって観察された観察度数を正規分布に当てはめ得るのは、その分布が対称な鐘状を呈している場合に限られている。しかし観察された分布の中には疲労試験における疲労寿命のように非対称な分布もある。このような非対称の分布でも、変数を対数目盛に、度数を普通目盛にとった片対数図表では対称な分布（対数正規分布¹⁾）に近づくことが知られている。この分布は、期待累加相対密度を縦軸に、疲労寿命を対数目盛で横軸にとった対数正規確率紙上では直線になる。従って、観察された度数分布をこの対数正規確率紙上にプロットして、それが直線に近似されることが確かめられれば、その度数分布は対数正規分布とみなすことができる。

一方、横軸は金属材料の疲労試験における疲労寿命のばらつきの現象を確率過程の問題として取扱っている。²⁾

すなわち、繰返し回数 N 回以降のクラックの発生（直接破壊に結びつくクラックの意で、クラックが発生してから破壊にいたるまでの荷重の繰返し数は無視できると考えられるので以後はクラックの発生を破壊の発生と考えることにする）が確率過程の問題とすると以下の式が得られる。

$$q(N) = Z_N / Z_t \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 1)$$

$$p(N) = \sum_N^{\infty} Z_N / Z_t \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 2)$$

$$\mu(N) = Z_N / \sum_N^{\infty} Z_N \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 3)$$

ここに、 $\mu(N)$ = 任意の繰返し回数 N において破壊が発生する確率

$q(N)$ = 繰返し回数 N と $N+1$ の間で破壊の発生する確率

$p(N)$ = 繰返し回数 N まで破壊が発生しない確率

Z_t = 試験した供試体の総数

Z_N = 繰返し数 N で破壊の生じた供試体数

繰返し回数が $N \gg 1$ なる一般の疲労試験においては、 N を連続変数として取扱っても大差はないから、 $q(N)$ の代りに $q(N) dN$ を用いれば、(6・2)式は、

$$p(N) = \int_N^{\infty} q(N) dN \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 4)$$

となり、

$$d p / d N = - \mu p \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 5)$$

であるから、 $\mu(N)$ は次式のように表わされる。

$$\mu(N) = -d(\log p)/dN \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 6)$$

ここに、 q は疲労寿命の度数分布を表わし、 $\log p$ は実験結果をヒストグラムで表わした q から求めることができる。

(6・5) 式において、近似的に N (すなわち時間) に関して $\mu = \text{一定}$ とすれば、

$$p = \exp(-\mu N) \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 7)$$

となり、疲労寿命の分布が指数分布にしたがうこと、すなわち疲労破壊現象が一次のポアソン過程であることを意味している。

供試体数が少ない場合に各疲労寿命 N についての生存確率 p を計算する場合には上述のような方法によることはできない。しかしそのような場合でも、順序統計量の理論を適用することによって次式から生存確率を求めることができる。³⁾

$$p = 1 - \frac{r}{n+1} \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 8)$$

ここに、 p は総数 n 個の供試体の疲労寿命の小さい方から順にならべたときの r 番目の期待値を表わし、さらに n 番目の確率が 0 にならないように n の代りに $n+1$ で割っている。

Freudenthal⁴⁾ は金属材料の疲労試験結果を用いて、(6・8) 式で求めた P を各応力比ごとに計算し、 p と N との関係を対数正規確率紙上にプロットし、両者の関係が直線で近似できることを確かめている。

鈴木⁵⁾ は、岩石の疲労寿命のばらつきをつぎのような手法で処理している。すなわち、岩石の疲労寿命の分布が(6・7)式で表わされるような一次のポアソン過程に従わないことを確かめ、次式に示すように、 p が一次のポアソン過程の和で表わされるとしている。

$$p = \sum_{i=1}^n \xi_i \exp(-\mu_i N) \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 9)$$

疲労寿命に関する確率分布関数が(6・9)式で与えられるならば、その確率密度関数 $f(N)$ は、定義により、

$$f(N) = -\frac{dp}{dN} = \sum_{i=1}^n \xi_i \mu_i \exp(-\mu_i \cdot N) \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 10)$$

で与えられる。確率密度関数が(6・10)式で与えられているとき、 N の期待値を求めると、それが疲労寿命の平均値を与えることになり、次式によって計算できる。

$$\bar{N} = \int_0^{\infty} N \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \mu_i \exp(-\mu_i \cdot N) dN$$

$$= \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{1}{\mu_i} \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 11)$$

本研究における疲労寿命のばらつきのように、その時間的な推移が確率的であるような現象に関しては、上述のような確率過程理論を用いて考察することが可能であると考えられる。

6.3 実験計画と実験方法

(1) 使用材料と供試体

実験に用いたコンクリートは、目標強度 (σ_{28}) が 24.0 kg/cm^2 程度の軽量および普通コンクリートで、その配合を表-6・1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(大阪社製)で、その物理的性質を表-6・2に示す。骨材は非造粒型人工軽量骨材宇部軽骨(宇部社製)の細粗骨材と天然砕石および川砂で、その物理試験結果を表-6・3および表-6・4に示す。

コンクリートの練混ぜは4切可傾式ミキサで行ない、コンクリートの締固めは棒突き法によった。練混ぜ時間は全材料投入後3分間である。供試体は打設後24時間、恒湿恒温室(約 20°C , R.H. 80%)内に放置した後脱型し、材令28日まで標準水中養生を施した。その後は試験日まで恒温室内に保存した。

試験時のコンクリートの材令は、強度が十分に安定していると考えられる100日以上経過したものである。なお静的強度試験ならびに疲労試験にはすべて $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体を用いた。

(2) 実験条件と実験方法

疲労試験に先立ち、各打設日ごとに3本の供試体を用いて静的強度試験を行なった。その静的強度より上限応力を決定し、疲労試験を開始した。

疲労試験機は、容量20tのパルセーター型疲労試験機(前川社製)で、その荷重と時間との関係は正弦波形、さらに繰返し载荷速度は300cpmである。

下限応力は機械の性能を考慮してすべて 2.0 kg/cm^2 とし、上限応力は静的強度に対する割合(%)で選び、その大きさは最高80%より5%間隔に、繰返し回数が200万回を越えても破壊しない応力比までとした。本実験においては、所定の上限応力に達するまでに約30秒～1分程度(上限応力の大きさにより異なる)要した。従って、同一応力比におけるばらつきを少なくするため、所定の荷重の約80%程度の荷重に達した時点より繰返し荷重の回数をカウントし始めることにした。

以上述べたような手順で行なった疲労試験とは別に、同一条件のもとで作成した供試体を用いて、繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性を調べるための実験を行なった。

実験に採用した上限応力は、軽量コンクリートで60および70％、普通コンクリートで70および80％の各2水準とした。

まず、所定の上限応力までの静的試験を実施し、処女応力-ひずみ曲線を求めた後疲労試験を実施した。疲労試験においては、供試体に貼付したワイヤストレインゲージをピックアップとし、動ひずみ計（新興通信社製）で増幅し、フォトコーダー（共和社製）を用いて、繰返し荷重下におけるコンクリートのひずみを記録した。同時に、試験機のラムに貼付したワイヤストレインゲージを用いて載荷重を検出し、フォトコーダーで記録した。

6.4 コンクリートの疲労試験結果と疲労寿命の分布

(1) 静的強度

疲労試験結果を述べる前に静的強度試験の結果について述べる。

コンクリートの打設は、軽量コンクリートを4回、普通コンクリートを2回に分けて行なった。各打設日ごとに供試体を3本ずつ抽出し、疲労試験開始直前に静的強度試験を行なった。その結果を表-6・5に示す。各打設日ごとの平均値をみるとかなりのばらつきがみられるので、上限応力を決定する場合、静的強度として全体の平均値を採用すべきかあるいは各打設日ごとの平均値を採用すべきかが問題になる。そこで各打設日ごとの平均値に有意差があるかどうかを分散分析によって検定した。分散分析表を表-6・6に示すが、いずれの場合も危険率5％で有意差がみとめられないので、静的強度としては全体の平均値、すなわち軽量コンクリートは250 kg/cm²、普通コンクリートは233 kg/cm²を採用した。

(2) 疲労試験結果と疲労寿命の分布

疲労試験結果を表-6・7および図-6・1～6・2に示す。表-6・7中のS, r, Nおよびpは、それぞれ、静的強度に対する応力比(％)、順序統計量、破壊までの繰返し回数(疲労寿命)および(6・8)式で計算した生存確率である。表-6・7および図-6・1～6・2より明らかなように、同一応力比であってもその疲労寿命にはかなりのばらつきがみとめられる。このばらつきは供試体に起因するもの(個々の供試体の静的強度がかならずしも同一でない)や、疲労試験機やその他の機器の性能のばらつきによるものばかりでなく、コンクリートの疲労破壊性状そのものの本質的な性質によるものでもあると考えられる。換言すれば、疲労破壊現象が確率的なものであることを示すものであると思われる。従って、この場合の平均寿命を単純な算術平均で表わしても無意味であり、なんらかの確率統計的な取扱いが不可欠であると思われる。

本実験の結果の各応力比における疲労寿命の分布より生存確率を求め（表-6・7参照），生存確率と疲労寿命との関係を対数正規確率紙上にプロットしたのが図-6・3および6・4である。図-6・3および6・4によれば，軽量コンクリートおよび普通コンクリートいずれの場合もほぼ直線で近似できる。従って，同一応力比におけるコンクリートの疲労寿命の分布は対数正規分布にしたがうことがみとめられた。

疲労寿命のばらつきが対数正規分布にしたがうことは岩石の圧縮疲労試験⁶⁾，引張疲労試験⁷⁾およびコンクリートの衝撃疲労試験⁸⁾においても確認されている。

6.5 S-N線図と200万回疲労強度

材料の疲労破壊に関してしばしば議論されるS-N線図を得るためには，各応力比における平均寿命を知ることが必要である。すでに前節で述べたように，コンクリートの疲労寿命については単純に算術平均を求めることは無意味である。

一方，対数正規確率紙上において疲労寿命の分布が直線で近似できるとき，その直線の $p=50\%$ における N が平均寿命になり，直線の勾配が標準偏差を表わす指標となる。そこで，図-6・3および6・4に示した各応力比における疲労寿命の回帰直線を最小2乗法によって求める。すなわち回帰直線を，

$$t = A \log N + B \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 12)$$

とすると，その定数 A ， B は次式によって決定される。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{n \sum (t \log N)}{n \sum (\log N)^2 - (\sum \log N)^2} \\ B &= \frac{\{-\sum \log N\} \cdot \sum (t \log N)}{n \sum (\log N)^2 - (\sum \log N)^2} \end{aligned} \right\} \text{-----} \quad (6 \cdot 13)$$

(6・12)式における t は正規分布曲線の対称軸からの距離で， p の値より正規積分の表⁹⁾を用いて求めたものである。従って， $p \geq 50\%$ のときは $t \geq 0$ であり， $p < 50\%$ のときは $t < 0$ である。(6・12)式において $t=0$ としたとき $p=50\%$ となり，そのときの N の値が平均寿命(\bar{N})に等しくなる。すなわち，

$$\log \bar{N} = -\frac{B}{A} \quad \text{または} \quad \bar{N} = 10^{-B/A} \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 14)$$

表-6・8に各応力比における A ， B ， $-B/A$ および \bar{N} を(6・13)および(6・14)

式によって計算した結果を示し、図-6・5に平均寿命と応力比との関係、すなわちS-N線図を示す。

これらの関係を直線で近似し、最小2乗法によってS-N直線を求めると、次式のようなになる。

$$\text{軽量コンクリート: } \log \bar{N} = 13.1 - 0.135 S \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 15)$$

$$\text{普通コンクリート: } \log \bar{N} = 19.4 - 0.191 S \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 16)$$

一般にコンクリートにおいては金属材料のように明瞭な疲労限の存在が確認されていないので、あらかじめ定めたある繰返し回数における時間強度をもって疲労強度としている。

ここでは $N=200$ 万回と定めて、(6・15)および(6・16)式にこれを外挿して疲労強度を求めると、軽量コンクリートで静的強度の50.4%、普通コンクリートで68.6%となり、軽量コンクリートの疲労強度は普通コンクリートのその約75%となることがわかる。

表-6・9に内外の研究者のS-N式と200万回疲労強度を示すが、いずれの場合も本研究とほぼ同様の傾向がみとめられる。すなわち軽量コンクリートと普通コンクリートとでは、その疲労破壊性状に若干の相違がみられ、この点については次節において、両者の材料特性の相違から検討することにする。

6.6 コンクリートの疲労特性

コンクリートの同一応力比における疲労寿命の分布がほぼ対数正規分布にしたがうことは前述のとおりである。ここでは疲労寿命の分布をさらに詳しく検討し、コンクリートの疲労破壊の特性について若干の考察を行なう。

横堀や鈴木らの研究によれば、金属材料や岩石の同一応力比における疲労寿命の分布が、(6・7)あるいは(6・9)式によって表わされることはすでに述べたとおりである。従って、縦軸に生存確率 p を対数目盛で、疲労寿命 N を横軸にとると、図-6・6に例示するように、金属材料の場合は一本の直線で、岩石の場合は2本以上の直線で近似できる。このような解析を行なうためには比較的多数の供試体を用いた実験結果によることが望ましい。横堀の実験では50～60個の供試体が、鈴木らの実験では32個の供試体が用いられている。本実験においては、各応力比に対してそれぞれ10個前後と供試体数が少なく厳密な比較を行なうことは困難であるが、同様の方法を用いて(6・7)および(6・9)式の各定数を決定し、表-6・10に示した。また、図-6・7および図-6・8にそれぞれ軽量コンクリートおよび普通コンクリートの生存確率と疲労寿命との関係の一例を示す。図-6・7および6・8によれば、軽量コンクリートの疲労寿命の分布は岩石のそれに近く、普通コンクリートの疲労寿命の分布は金属材料のそれに近いよ

うに思われる。しかし詳細にみれば普通コンクリートの場合もその関係は下に凸な曲線で表わされるような傾向にあり、厳密には金属材料の疲労破壊とは異なった機構によるものと考えられる。

図-6・7に示した軽量コンクリートの疲労寿命と生存確率との関係は次式で表わされる。

$$P = P_1 + P_2 \\ = 0.54 \exp(-0.52 \times 10^{-3} N) + 0.46 \exp(-0.81 \times 10^{-2} N) \text{ ----- (6・17)}$$

(6・17)式で表わされる軽量コンクリートの疲労破壊特性は2種類の1次ポアソン過程が並列に存在し、各供試体の疲労破壊が P_1 および P_2 で表わされるいずれかの過程によって起こることを意味する。すなわち、二つの過程は互いに独立なもので、連鎖的、累積的なものではない。

一方、金属材料の疲労破壊の内部機構について横堀はつぎのように述べている。¹⁶⁾

金属材料の疲労破壊までの寿命をつぎの4段階に分けて考える。

第1段階；負荷開始後加工硬化が完了するまでの期間

第2段階；加工硬化完了後、超微視的クラックの発生までの期間

第3段階；この超微視的クラックが認知検出可能な大きさのクラックに達するまでの期間

第4段階；この認知検出可能なクラックが結晶粒を横切って、最後の破壊にいたる期間

これらのうち、第1および第4段階は全寿命のうちのきわめてわずかな部分であり、疲労寿命のばらつきは第2および第3段階におけるばらつきによるものであるとしている。すなわち金属材料の疲労破壊は上述の4段階を経て、連鎖的、累積的に進行するものであるとしている。このような場合の疲労破壊過程は、4次ないしは2次のポアソン過程となり、供試体の生存確率は、上記各段階の推移確率(μ)がすべて等しいと仮定すると次式で与えられる。

$$P = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\mu \cdot N)^i}{i!} \cdot \exp(-\mu N) \text{ ----- (6・18)}$$

(6・18)式において $m=1$ とすれば(6・7)式に等しくなり、 $m \geq 2$ の場合には疲労寿命がガンマー分布することを意味する。

図-6・9に(6・18)式において、 $m=1, 2$ および4としたときの生存確率と疲労寿命との関係を示す。図-6・9によれば、疲労破壊が上述のように連鎖的、累積的な現象であるとするならば、 $P-N$ 線図は上に凸な曲線になる。

ところが、図-6・7によれば、軽量コンクリートの $p-N$ 線図は下に凸な傾向にある。このことより軽量コンクリートの疲労破壊が供試体内部の損傷の累積によって起こるものではなく、互いに独立な二つの破壊過程のいずれかによって起こるものと考えられる。

図-6・8に示した普通コンクリートの $p-N$ 線図も下に凸な傾向にあり、その疲労破壊は金

属材料のそれとは異なった機構によるものと考えられる。

なお上述の推移確率すなわち破壊の速度定数 μ が時間とともに低下する現象は前章のクリープ破壊においても観察され、このような現象はコンクリートのクリープ破壊や疲労破壊などの時間効果を有する破壊に共通な性質である。

以上においては、速度定数 μ は一定、すなわち、任意の繰返し回数 N において破壊の発生する確率は各供試体とも同一であるとしている。しかし、疲労寿命のばらつきがこの速度定数のばらつき、換言すれば供試体個々の静的強度のばらつきに起因するものでないかということが問題になる。すなわち各供試体ごとに破壊発生速度定数が異なり、速度定数の小さい、静的強度の大きいものの疲労寿命が長くなるために同一応力比であっても疲労寿命にばらつきがあるのではないかという疑問が生じる。しかしこの点については松下¹⁷⁾によって報告されているように、 10^4 回の繰返し荷重を受けて破壊しなかった供試体の静的強度が基準とした静的強度と大差がないことにより否定される。

以上述べたことをまとめると、コンクリートの疲労破壊現象は、金属材料のように繰返し荷重によって供試体内部の損傷が累積的に進行することによっておこるものではなく、1種類ないしは2種類の互いに独立な破壊過程によっておこるものであると考えられる。また破壊の速度定数は時間とともに低下する傾向にある。

つぎに、軽量コンクリートと普通コンクリートの疲労破壊特性の相違がいかなる材料特性の相違に起因するものであるかということが問題になる。

実験に用いた軽量および普通コンクリート両者の間にある材料特性の相違は、骨材自身の強度のみであり、他の条件はほぼ同一であると考え得る。このような観点より、軽量および普通コンクリートの疲労破壊特性の相違を考察する。

¹⁸⁾ 著者らは骨材自身の強度を知るため、本実験に用いた骨材と同一の天然砕石および字部軽骨、さらに現在市販されているすべての人工軽量骨材各500個を用いて点載荷圧裂試験を行ない、その結果を統計的に処理し骨材の強度とそれに影響をおよぼす要因について考察した。それによれば、字部軽骨および天然砕石の強度は著しくばらつくが、その平均圧裂強度はそれぞれ約30～40 kg/cm²および100～200 kg/cm²で、その両者の間にはかなりの差がみとめられた。

また疲労破壊現象を観察した結果によれば、普通コンクリートの場合供試体表面に微少なクラックが観察された後もすぐに破壊にいたることなくかなりの繰返し数に耐える、すなわちクラックの呼吸¹⁹⁾(*breathe*)現象がみられたが、軽量コンクリートではそのような現象はみられなかった。

以上述べたことを考慮すると、軽量コンクリートおよび普通コンクリートの疲労破壊性状は大

略つぎのように推測することができる。

コンクリートに繰返し荷重が載荷されるとコンクリート中のセメントペースト部に多数のマイクロクラックが発生する。このクラックは荷重の繰返しとともに進展し粗骨材表面に達する。骨材の存在はクラックの進展を妨げる役目をし、骨材の強度が十分に大きい場合は、クラックは骨材とペーストとの境界に存在する付着力を断ち伸展しやがて破壊クラックへと生長する。一方クラックが強度の非常に小さい骨材に達すると、骨材によってその進展が妨げられることなく、骨材粒を横切って生長することになり、それだけクラックの進展は早く、破壊に要する時間も短かくなると予想される。

軽量コンクリートにおいて P_1 と P_2 なる二つの破壊過程が存在すると前述したが、それは軽量コンクリートの疲労破壊がコンクリート中の弱い骨材を横切ってクラックが進展し破壊する過程と、強い骨材とペーストとの境界を迂回してクラックが進展し破壊する過程との、二つの過程が混在することを意味するものであると考える。

一方普通コンクリートでは、骨材自身の強度が強く、クラックはすべて骨材を迂回して進展すると予想されるため、同一応力下においても図-6・5からも明らかのように軽量コンクリートより破壊に要する時間が長く、多くの繰返しに耐えるものと思われる。

このような現象は、²⁰⁾ 柳場らの行なったソイルセメントの圧縮疲労試験の結果からもうかがわれる。すなわち、ソイルセメントに砕石を混入した供試体の $S-N$ 線図は本実験の普通コンクリートの $S-N$ 線図と一致し、砕石を混入しない供試体の $S-N$ 線図は軽量コンクリートのそれに一致し、骨材の存在によって破壊が遅れることがわかる。

なお、表-6・10に示した各応力比における平均寿命と応力比との関係を図示すると図-6・10のようになり、そのときの $S-\bar{N}$ 直線は次式で表わされる。

$$\text{軽量コンクリート ; } \log \bar{N} = 14.1 - 0.144 S \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 19)$$

$$\text{普通コンクリート ; } \log \bar{N} = 20.0 - 0.196 S \quad \text{-----} \quad (6 \cdot 20)$$

また、200万回疲労強度を求めると、軽量コンクリートで静的強度の54.3%、普通コンクリートで69.6%となり、疲労寿命の分布を対数正規分布で仮定して求めた疲労強度よりも若干大きくなる。

6.7 高サイクル繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性

表-6・11に繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性を検討するために行なった実験の結果を示す。表中 N_u は破壊までの繰返し回数(疲労寿命)で、 E_0 は疲労試験の前に行なった

静的試験における応力-ひずみ曲線から求められる静的強度の $1/3$ の応力に対する割線弾性係数である。また E_{N0} は疲労試験開始後最初 ($N=100$ または 200) に得られた応力-ひずみ曲線から求められる割線弾性係数で、それは静的強度の $1/3$ の応力と下限応力との間の割線弾性係数である。なお空欄になっているところは測定できなかったものである。

応力-ひずみ曲線より求めた弾性係数と $N=100$ または 200 回における繰返し荷重下の応力-ひずみ曲線より求めた弾性係数とでかなり異なるものがあるが、これは両者の荷重方法およびひずみの測定方法などが異なるためではないと思われる。

図-6・11～6・18は繰返し荷重下におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線の代表的なものを示したものである。

一般に、繰返し荷重下におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線は、最初は上に凸で、荷重の繰返し回数が増すにつれて直線状となり、破壊近くになればS字形になるといわれているが、本実験の結果においてもほぼ同様の傾向が観察される。本実験においては、繰返し荷重載荷直後の応力-ひずみ曲線が得られていないため厳密な検討はできないが、 $N=100$ ないし 200 回における応力-ひずみ曲線の形状から想像し得るように、繰返し荷重載荷後のごく早い時期において応力とひずみの関係は直線ないしは下に凸な曲線になっている。またその後はやや安定な状態で荷重の繰返しとともにひずみが徐々に増加し、破壊近くになるとひずみの増加する割合が大きくなる傾向がみられる。

図-6・19～6・22は繰返し荷重下における弾性係数の変化を示したものである。横軸は破壊までの繰返し回数に対する割合で、縦軸は $N=100$ ないし 200 回における弾性係数に対する割合で示した。なお弾性係数は静的強度の $1/3$ の応力と下限応力との間の割線弾性係数である。

供試体個々によって多少のばらつきはあるが、全体としての傾向をみれば、弾性係数は荷重の繰返しとともに徐々に減少する。また、普通コンクリートと軽量コンクリートとでは若干傾向が異なる。すなわち普通コンクリートでは破壊近くになれば弾性係数は初期の70%程度まで低下するものもあるが、軽量コンクリートでは弾性係数の低下の割合は少なく、80%程度である。また、同一のコンクリートにおいては載荷応力比による影響はみとめられないようである。

図-6・24～6・27は荷重の繰返しに伴う上限応力時のひずみ(上限ひずみ)の変化を示したものである。すなわち図-6・23に示すように、繰返し回数100ないし200回における上限ひずみ(ϵ_u)に対する割合で示したひずみを縦軸に、破壊時の繰返し回数(N_u)に対する割合で示した荷重繰返し数を横軸にとってプロットしたものである。

図-6・24～6・27によれば、上限ひずみは繰返し荷重を載荷した直後にやや急激に増加

し、その後は荷重繰返しとともにほぼ一定の割合でひずみが増加し、破壊近くなると再び急激にひずみが増大する。このような現象は、前章で論じた持続荷重下におけるコンクリートの破壊までの変形挙動とまったく同一であるといえる。すなわち繰返し荷重下におけるコンクリートの上限ひずみの時間的な変化は、ひずみ速度が徐々に小さくなる遷移領域、ひずみ速度が一定かつ最小となる定常領域およびひずみ速度が次第に増大してついに破壊にいたる加速領域の三つの部分に分けられる。

図-6・28は定常領域のひずみ速度と破壊までの繰返し回数（疲労寿命）との関係を示したものである。供試体の数が少なくまた図-6・24～6・27からも明らかなように載荷から破壊までの全領域にわたってのひずみ測定ができていないため、厳密に検討することは困難であるが、全体の傾向は前章で示したクリープ破壊の場合とほとんど同様の傾向がみられる。すなわち定常領域のひずみ速度が小さくなれば疲労寿命は長くなる。

6・6で述べた繰返し荷重下のコンクリートの破壊の推移確率が時間とともに低下する現象や、上述の変形挙動などを総合すると、持続荷重および繰返し荷重と荷重の種類は異なっても、その時間的な変形挙動や破壊の様相は非常によく類似している。ただ持続荷重下の破壊では耐久限度が認められたが、繰返し荷重下においては認められていない点が異なる。しかし疲労限が存在しないことは繰返し回数が1000万回以下でのことであり、それ以上の範囲では不明である。

6.8 結 論

本章においては繰返し荷重下のコンクリートの疲労破壊現象につき明らかにすることを主眼として圧縮疲労試験を行ない、疲労寿命の分布、疲労破壊の確率論的な性質、普通コンクリートと軽量コンクリートとの疲労破壊性状の相違および繰返し荷重下におけるコンクリートの変形挙動について検討した。

本章において得られた結果を要約するとつぎのとおりである。

- 1) コンクリートの疲労寿命は同一応力比であっても著しくばらつき、普通コンクリートおよび軽量コンクリートのいずれの場合も、その分布は対数正規分布する。
- 2) 普通コンクリートおよび軽量コンクリートの200万回疲労強度は、それぞれ静的破壊強度の68.6%および50.4%となり、両者間でかなりの差がみとめられる。また本実験の範囲では疲労限は存在しないようである。
- 3) 普通コンクリートの疲労破壊現象は1次のポアソン過程で、軽量コンクリートのそれは1次のポアソン過程の和として表わされるが、いずれの場合もその破壊の推移確率は荷重繰返しとともに（時間とともに）低下する傾向が見られる。このことより、コンクリートの疲労

破壊の内部機構は、材料内部の損傷が連鎖的、累積的に進行することによっておこると考えられる金属材料の疲労破壊の内部機構とは異なると推察される。

- 4) 普通コンクリートと軽量コンクリートとの疲労破壊現象は若干異なるが、それは両者の骨材の強度の相違によるものと思われる。すなわち、繰返し荷重の載荷によって供試体内部に発生したクラックが荷重の繰返しとともに生長伸展し粗骨材の表面に達する。軽量コンクリートではクラックが弱い骨材を横切って発達する場合と、強い骨材を迂回して発達する場合の二つの互いに独立な過程が考えられるが、普通コンクリートでは骨材強度が大きいためクラックは骨材を迂回して発達すると考えられる。以上のような破壊機構の相違により、同一応力比における普通コンクリートの疲労寿命の方が軽量コンクリートのそれよりも長くなったのであると思われる。
- 5) 繰返し荷重下におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線は、最初は上に凸な状態から直ちに直線状ないしは下に凸な曲線に変わり、破壊近くなるとS字形になる。
- 6) コンクリートの弾性係数は、荷重の繰返しとともに徐々に低下する。またそれは軽量コンクリートよりも普通コンクリートにおいて顕著である。
- 7) 繰返し荷重下におけるコンクリートの上限ひずみの時間的な変化を観察した結果によれば、最初はひずみ速度が時間とともに低下する遷移領域が現われ、つぎにひずみ速度が時間に無関係に一定かつ最小になる定常領域を経て、ひずみ速度が次第に増大する加速領域にいたりコンクリートは破壊する。
- 8) 定常領域におけるひずみ速度と疲労寿命との間には密接な関係があり、ひずみ速度が小さくなるにしたがって疲労寿命は長くなる。
- 9) 以上に得られた1)、3)、7)および8)は前章のクリープ破壊の場合と同一の現象であり、このことより持続荷重下および繰返し荷重下いずれの場合においても破壊の確率論的な性質や破壊までの変形挙動は同一であると思われる。

〈 第 6 章 参考文献 〉

- 1) 岸根卓郎, “理論・応用統計学” 養賢堂, 1969
- 2) 横堀武夫, “材料強度学” 技報堂, 1955, PP.178~182
- 3) E.J.Gumbel(河田竜夫他監訳), “極値統計学” 広川書店, 昭和38年, PP.45~51
- 4) 既出2) PP.261~263
- 5) 鈴木, 西松, ヘルセオヨ, “岩石の疲労寿命の分布特性とS-N線図” 日本鉱業会誌, 86巻, 968号, 1970年5月
- 6) 西松, Heroesewojo, “岩石の疲労寿命の分布特性と破壊機構” 材料, 第22巻, 第233号, 昭和48年2月
- 7) 西松, Heroesewojo, “片振り引張荷重による岩石の疲労破壊の確率過程論的考察” 材料, 第21巻, 第230号, 昭和47年11月
- 8) 尼崎, 明石, 竹内, 桂木, “コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究” 土木学会論文報告集, 第217号, 1973年9月
- 9) 三上操, “応用推計学” 内田老鶴園新社, 1964, P.374
- 10) F.S.Opele and C.L.Hulsbos, “Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient” Journal of the ACI, No. 63-2, January, 1966
- 11) E.W.Bennet, “Some Fatigue Tests of High Strength Concrete in Axial Compression” Magazine of Concrete Research, Vol. 19, No.59, June, 1967
- 12) J.De.C.Antrim and J.F.McLaughlin, “Fatigue Study of Air-Entrained Concrete” Journal of the ACI, Vol.55, No.70, May, 1959
- 13) 松下, 徳光, “コンクリートの圧縮疲労試験” 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 昭和47年10月
- 14) 浜田, 成岡, “軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験” 土木学会論文報告集, 第176号, 1970年4月
- 15) C.H.Warren, J.F.McLaughlin and J.D.Antrim, “Fatigue Prop-

erties of Light-weight Aggregate Concrete" Journal of the
ACI, No. 58-6, August, 1961

16) 既出2) P.169

17) 松下博通, "繰返し荷重下のコンクリート部材の疲労性状について" 土木学会第28回年次
学術講演会講演概要集, 第5部, 昭和48年10月

18) 西林, 木山, 阪田, "点載荷圧裂試験による人工軽量骨材の強度に関する研究" 土木学会論
文報告集, 第199号, 1972年3月

19) K.D.Raithby and A.C.Whiffin, "Failure of Plain Concrete
under Fatigue Loading-A Review of Current Knowledge" PRL
Report, LR231, 1958. P. 12

20) 榑場, 川村, "骨材を含むソイルセメントの圧縮疲労特性" 土木学会第30回年次学術講演
会講演概要集, 第5部, 昭和50年10月

21) Van Ornum, "Fatigue of Cement Products" Transactions, ASCE
Vol. 51, 1903

表-6・1 配 合 表

Specimen	Slump (cm)	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Pozz. No. 8
Lightweight concrete	5 ± 1	59	275	163	46	612	593	% Cx 0.25
Normal concrete	"	56	280	158	41	764	1160	"

表-6・2 使用セメントの物理的性質

Specific gravity	Soundness	Flow	Fineness	Setting Time	
			Specific surface	Initial	Final
315	good	252	(cm ² /g) 3230	(hr-m) 2-55	(hr-m) 4-05
Bending Strength (kg/cm ²)			Compressive Strength (kg/cm ²)		
3days	7days	28days	3days	7days	28days
349	520	748	143	244	416

表-6・3 粗骨材の物理的性質

	Specific gravity	Absorption (%)	Weight of unit vol. (kg/m ³)	Fineness modulus
Ube- keikotsu	1.57	13.0	843	6.51
Crushed stone	2.70	1.21	1530	7.29

表-6・4 細骨材の物理的性質

	Specific gravity	Absorption (%)	Weight of unit vol. (kg/m ³)	Fineness modulus
Ube- keikotsu	1.90	11.5	1120	2.53
River sand	2.56	1.23	1420	2.98

表-6·5 静的強度

	Lightweight concrete				Normal concrete	
Batch	A	B	C	D	E	F
Compressive strength (kg/cm ²)	289	264	229	207	203	260
	287	240	255	232	201	279
	239	270	265	223	250	203
Average	272	258	250	221	218	247

表-6·6 分散分析表

Specimen		Sums of squares	Degrees of freedom	Mean square	F-ratio
Light-weight Concrete	Between	4167	3	1389	$F = \frac{1389}{387} = 3.59$
	Within	3099	8	387	
	Total	7266	11		$F_{95}(3 \cdot 8) = 4.07$
Normal Concrete	Between	1263	1	1263	$F = \frac{1263}{1167} = 1.08$
	Within	4667	4	1167	
		5930	5		$F_{95}(1 \cdot 4) = 7.71$

表-6・7 疲勞試驗結果

表-6・7 疲劳試驗結果							
Lightweight				Concrete			
S	r	N	p	S	r	N	p
80	1	100	0.857	65	1	5160	0.900
	2	190	0.714		2	5830	0.800
	3	260	0.571		3	6980	0.700
	4	470	0.429		4	12250	0.600
	5	1180	0.286		5	57100	0.500
	6	2560	0.143		6	80000	0.400
75	1	150	0.917	65	7	263800	0.300
	2	230	0.833		8	366200	0.200
	3	290	0.750		9	794760	0.100
	4	290	0.667	60	1	14000	0.889
	5	290	0.583		2	18000	0.778
	6	320	0.500		3	18800	0.667
	7	540	0.417		4	23100	0.556
	8	590	0.333		5	59900	0.444
	9	620	0.250		6	77900	0.333
	10	970	0.167		7	575200	0.222
	11	3090	0.083		8	721000	0.111
70	1	610	0.875	55	1	128000	0.857
	2	1980	0.750		2	395200	0.714
	3	2150	0.625		3	439600	0.571
	4	3760	0.500		4	554600	0.429
	5	5230	0.375		5	567500	0.286
	6	8000	0.250		6	805800	0.143
	7	15250	0.125	50	1	> 2000000	
			2		> 2000000		
Normal Concrete							
S	r	N	p	S	r	N	p
80	1	2600	0.889	70	1	96400	0.889
	2	4850	0.778		2	286000	0.778
	3	6000	0.667		3	373200	0.667
	4	7960	0.556		4	458700	0.556
	5	16680	0.444		5	928210	0.444
	6	16800	0.333		6	964400	0.333
	7	17280	0.222		7	1852800	0.222
	8	31800	0.111		8	2250000	0.111
75	1	47800	0.917	65	1	489000	
	2	79280	0.833		2	> 2000000	
	3	104800	0.750		3	> 2000000	
	4	121400	0.667		4	> 2000000	
	5	130000	0.583		5	> 2000000	
	6	183000	0.500		6	> 2000000	
	7	283200	0.417				
	8	298350	0.333				
	9	419850	0.250				
	10	498200	0.167				
	11	1000000	0.083				

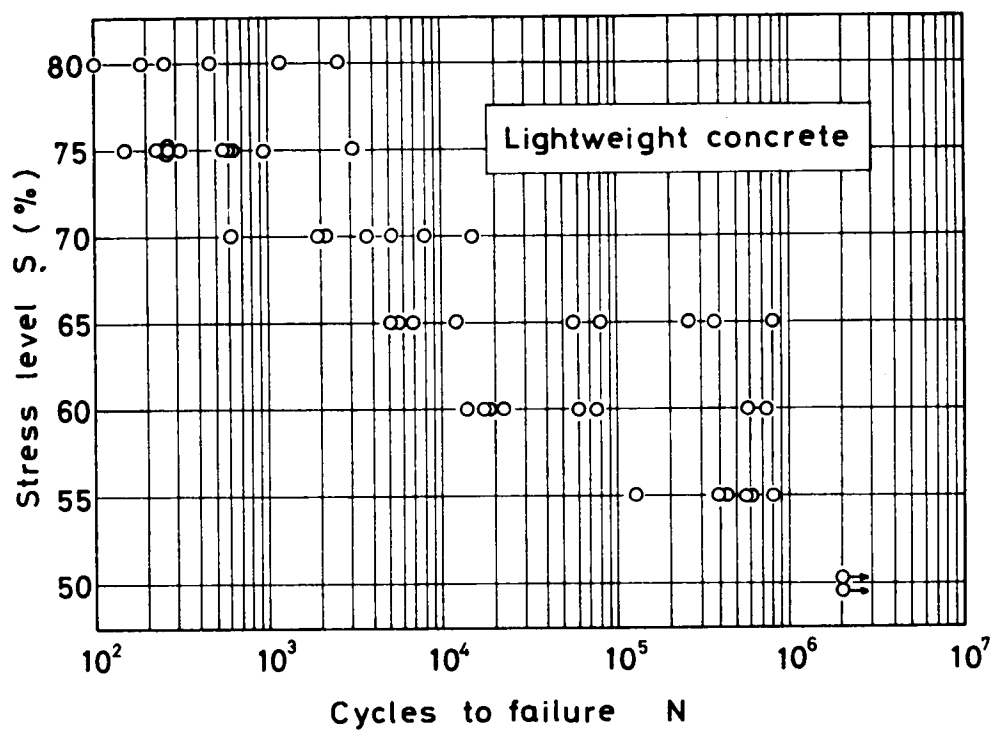


図 - 6 ・ 1 応力レベルと疲労寿命との関係

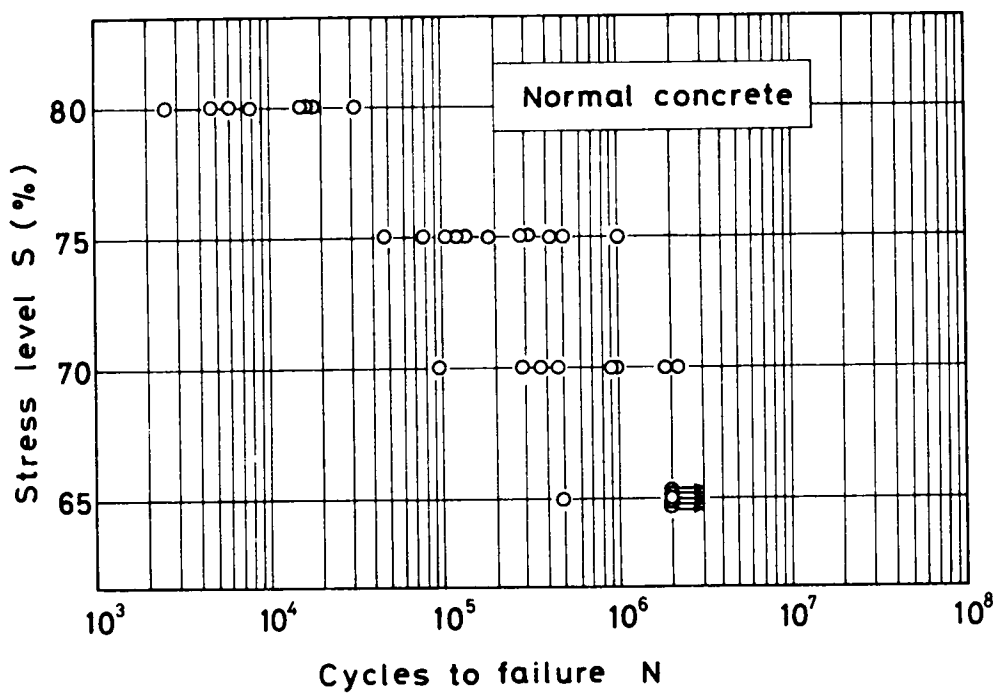


図 - 6 ・ 2 応力レベルと疲労寿命との関係

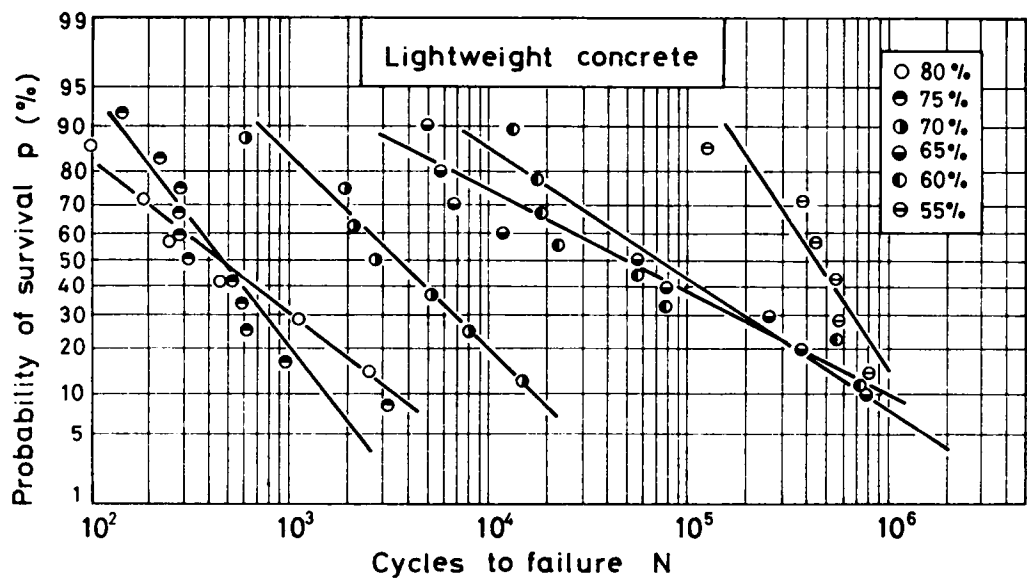


図 - 6 ・ 3 疲労寿命の分布

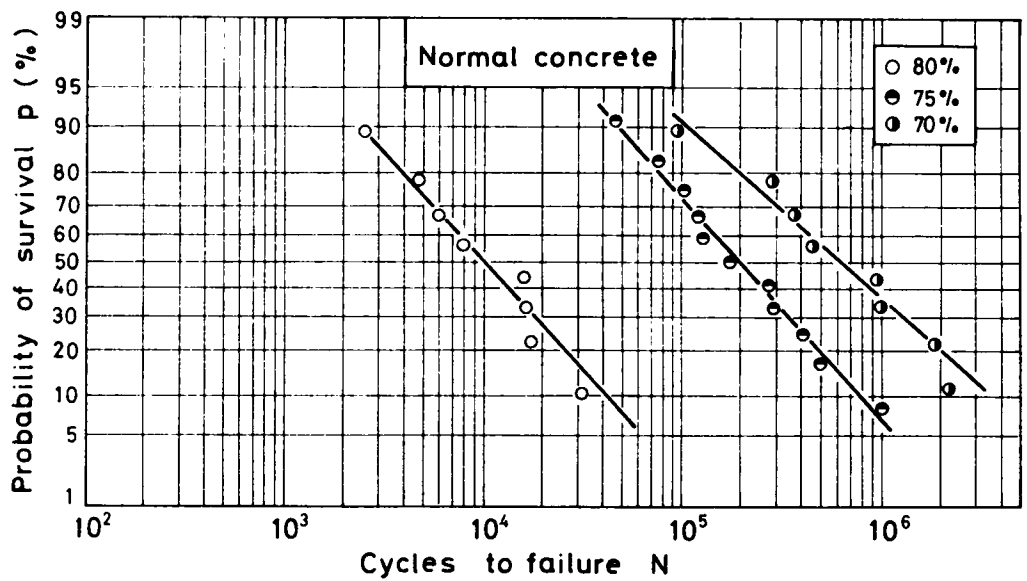


図 - 6 ・ 4 疲労寿命の分布

表-6・8 実験定数と平均寿命

Specimen	S	A	B	$-B/A$	\bar{N}
Light-weight Concrete	8.0	-1.456	3.846	2.6415	438
	7.5	-2.198	5.827	2.6510	448
	7.0	-1.333	4.718	3.5394	3500
	6.5	-0.938	4.381	4.6706	46800
	6.0	-1.100	5.271	4.7918	61900
	5.5	-2.534	14.253	5.6247	421400
Normal Concrete	8.0	-2.185	8.732	3.9959	9910
	7.5	-2.151	11.401	5.3005	199700
	7.0	-1.746	10.092	5.7806	603400

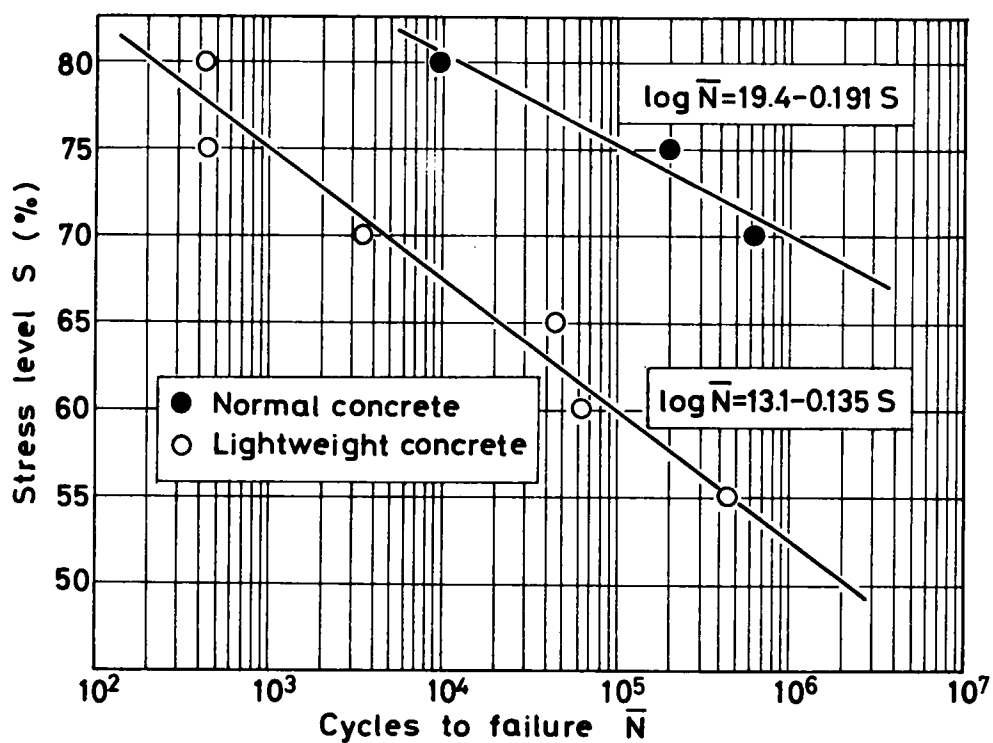


図-6・5 コンクリートのS-N線図

表-6・9 S- \bar{N} 直線と200万回疲労強度

コンクリートの種類	研 究 者	S- \bar{N} 直 線	200 万回疲労強度(%)
普通コンクリート	Opel ¹⁰⁾	$\log \bar{N} = 18.2 - 0.182 S$	65.4
	Bennet ¹¹⁾	$\log \bar{N} = 21.6 - 0.232 S$	65.9
	Antrim ¹²⁾	$\log \bar{N} = 20.5 - 0.214 S$	66.4
	松下, 徳光 ¹³⁾	$\log \bar{N} = 18.4 - 0.198 S$	61.1
	筆 者	$\log \bar{N} = 19.4 - 0.191 S$	68.6
軽量コンクリート	浜田, 成岡 ¹⁴⁾	$\log \bar{N} = 20.3 - 0.240 S$	58.3
	Warren ¹⁵⁾	$\log \bar{N} = 12.4 - 0.104 S$	58.6
		$\log \bar{N} = 13.1 - 0.118 S$	57.6
		$\log \bar{N} = 11.3 - 0.085 S$	58.8
	筆 者	$\log \bar{N} = 13.1 - 0.135 S$	50.4

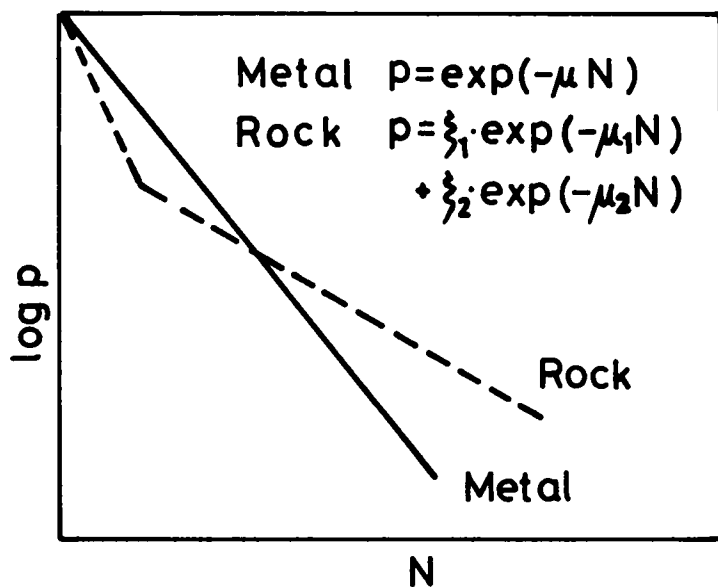


図-6・6 log p - N線図

表-6・10 実験定数と平均寿命

Specimen	S	ξ_1	$\mu_1 (\times 10^{-3})$	ξ_2	$\mu_2 (\times 10^{-2})$	\bar{N}
Light-weight Concrete	80	0.54	0.52	0.46	0.81	1090
	75	0.23	0.33	0.77	0.34	922
	70	1.00	0.15			6667
	65	0.45	0.0019	0.55	0.0048	248000
	60	0.45	0.0017	0.55	0.0045	276930
	55	1.00	0.0018			555556
Normal Concrete	80	1.00	0.67			14925
	75	1.00	0.031			322581
	70	1.00	0.0097			1030928

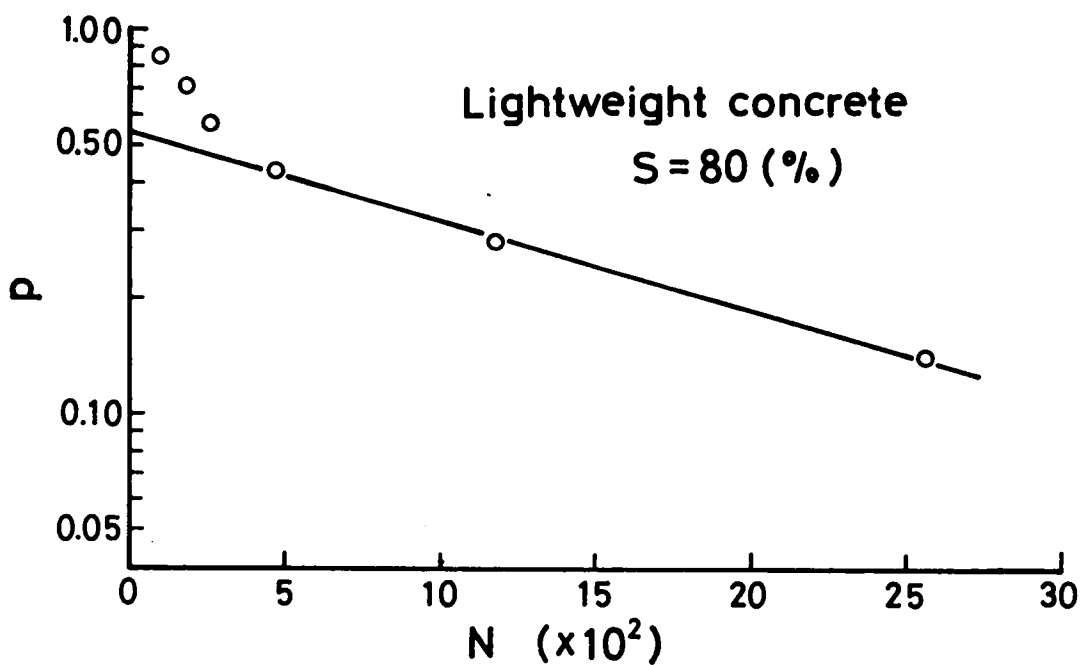


図 - 6 ・ 7 疲労寿命の分布

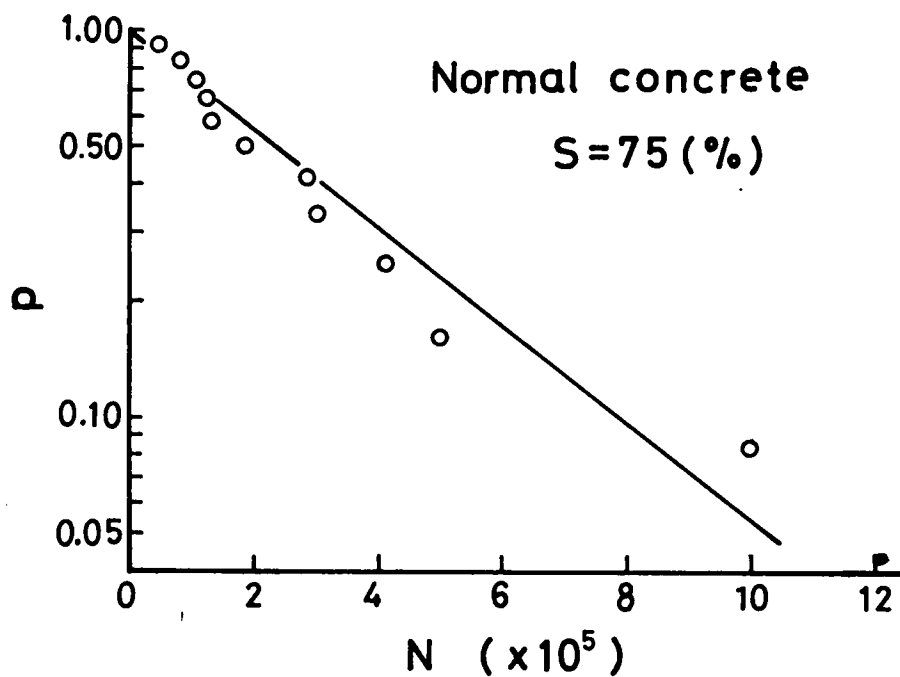


図 - 6 ・ 8 疲労寿命の分布

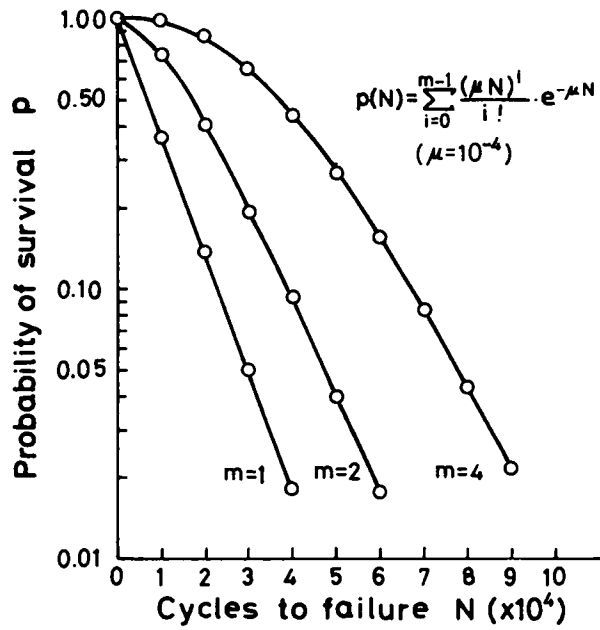


図 - 6 ・ 9

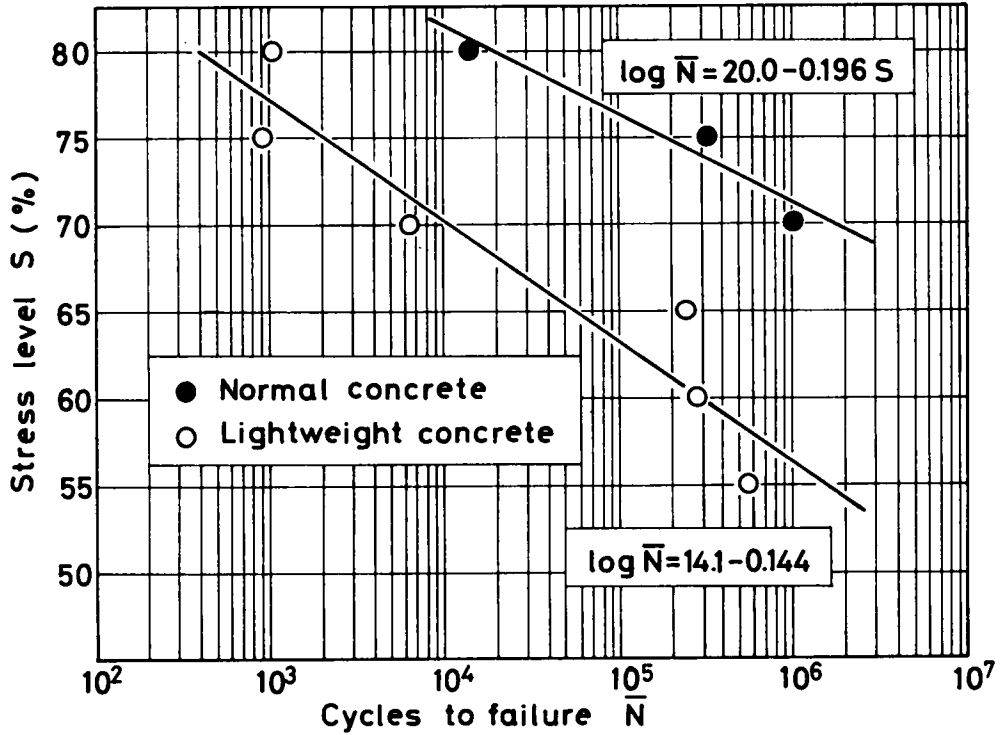


図 - 6 ・ 1 0 コンクリートの S-N 線図

表 - 6 ・ 1 1 実 験 結 果

Normal conc. S = 80 %				Normal conc. S = 70 %			
No	Nu	E_o ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)	E_{NO} ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)	No	Nu	E_o ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)	E_{NO} ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)
1	1150	261	230	1	2700	256	223*
2	1150	253	265	2	3430	268	203
3	1300	268	216	3	8900	264	270*
4	2500	268	249	4	9500	257	242
5	4100	268	254	5	34900	221	243
6	8850	264	266	6	36900	242	271*
7	26300	256	248	7	94500	273	269
8	36600	264	320	8	128000	244	275*
9	42100	257	261	9	150000	254	274*
Lightweight conc. S = 70 %				Lightweight conc. S = 60 %			
No	Nu	E_o ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)	E_{NO} ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)	No	Nu	E_o ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)	E_{NO} ($\times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$)
1	440	1.10	0.98	1	1600	—	0.98*
2	560	0.97	0.95*	2	4100	1.14	1.38
3	940	1.13	1.15	3	4500	1.20	0.89*
4	1590	1.04	1.03	4	5200	1.08	1.11*
5	2750	1.35	1.03	5	7400	—	1.00*
6	5240	1.20	1.03	6	30000	1.04	1.04*
7	37950	1.13	1.31	7	40800	—	1.20*
8	56200	1.36	1.36	8	70100	1.04	0.97*

*印 No = 200 その他は No = 100

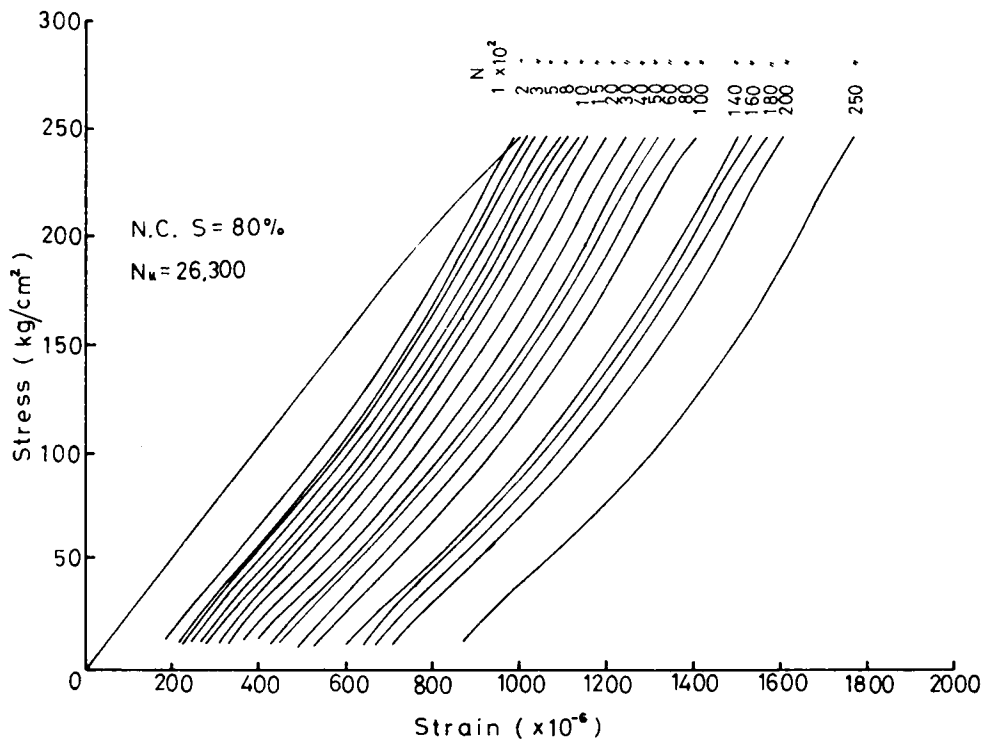


図-6・11 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

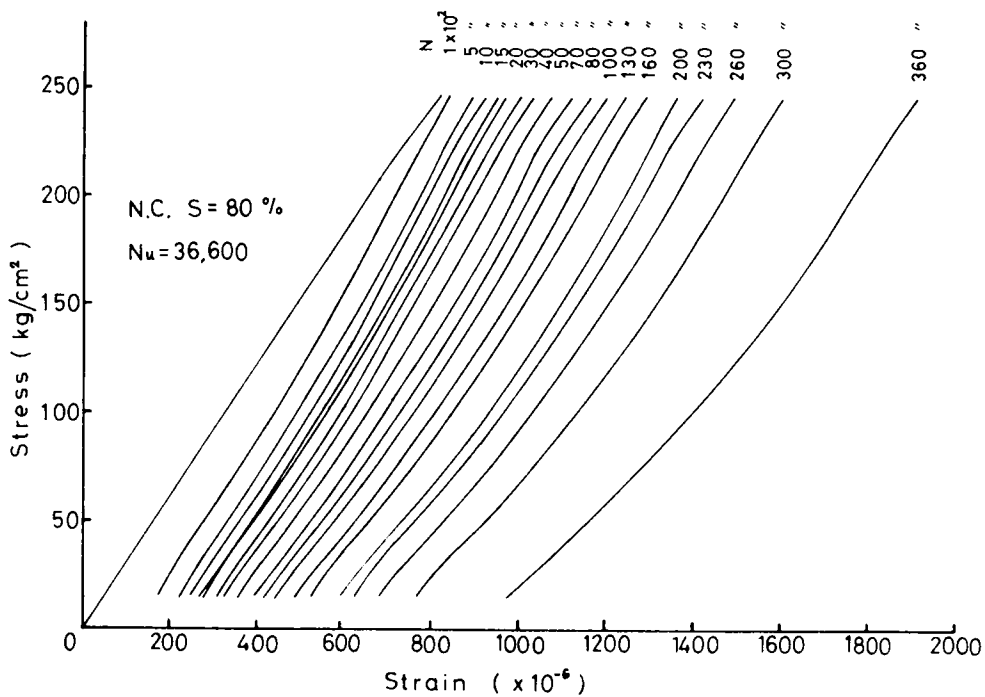


図-6・12 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

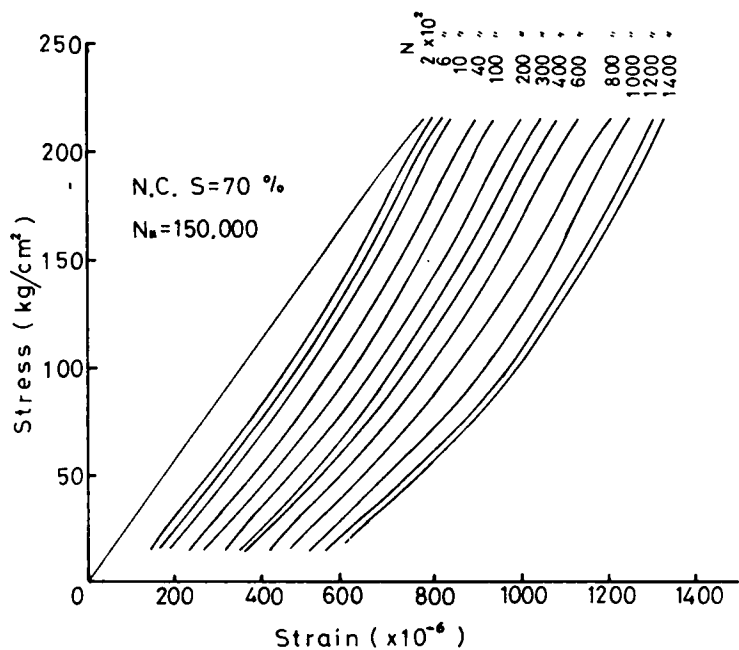


図-6・13 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

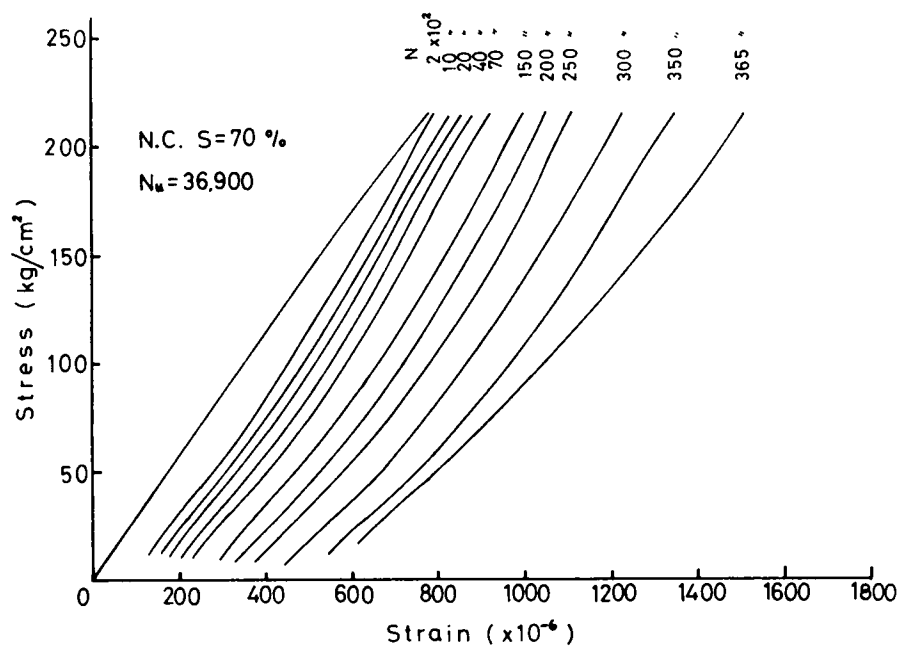


図-6・14 繰返し荷重下における一応力ひずみ曲線

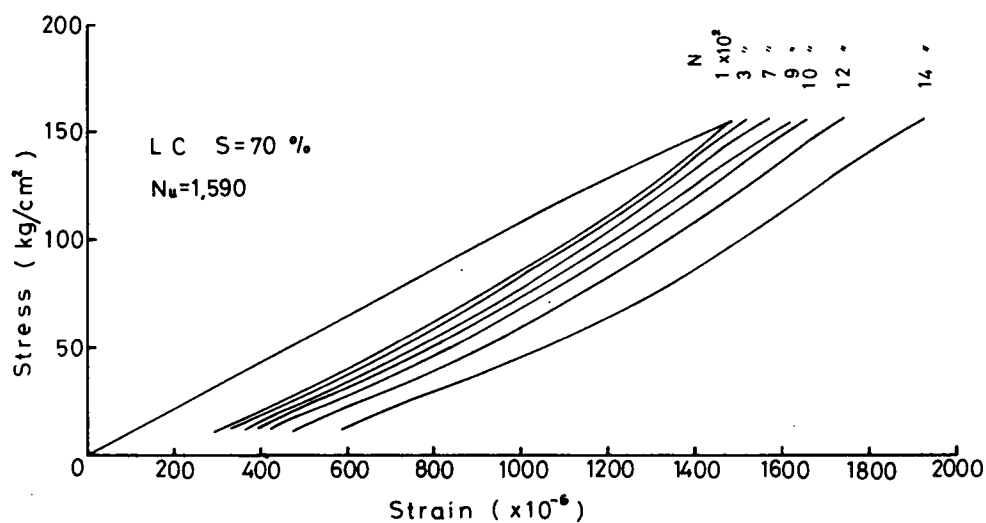


図 - 6 ・ 1 5 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

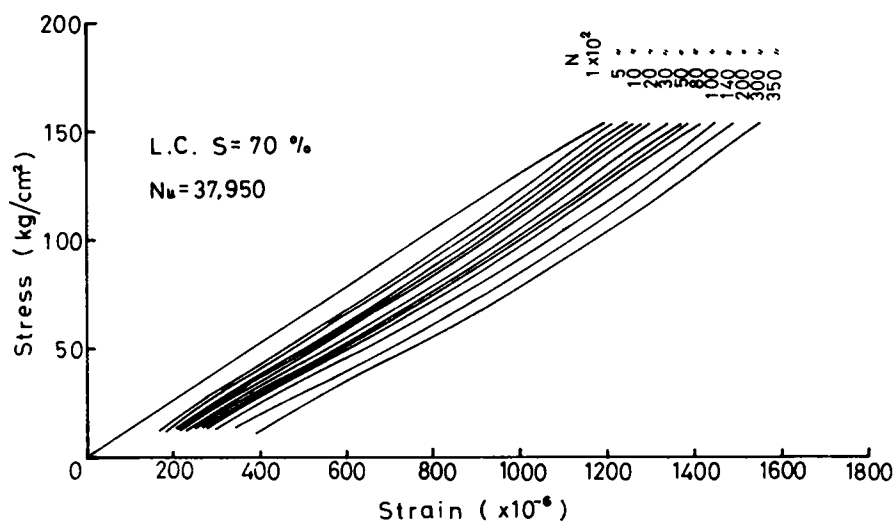


図 - 6 ・ 1 6 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

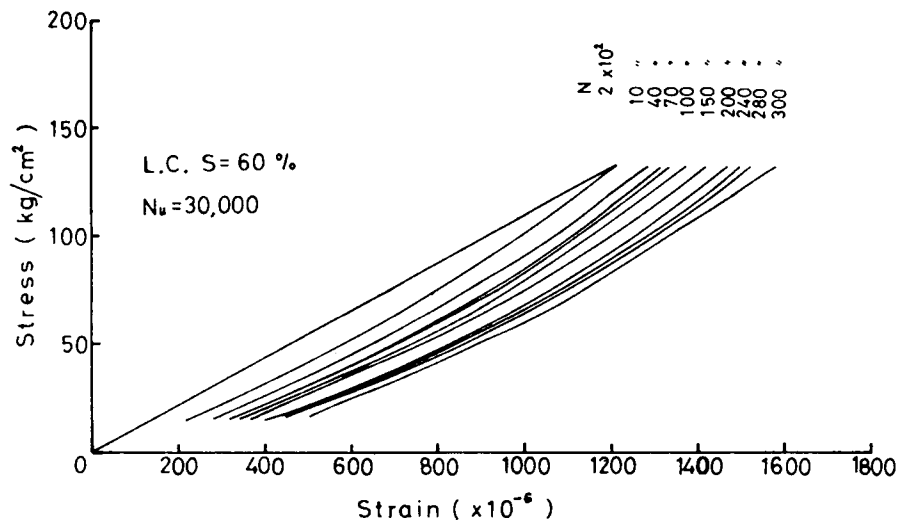


図-6・17 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

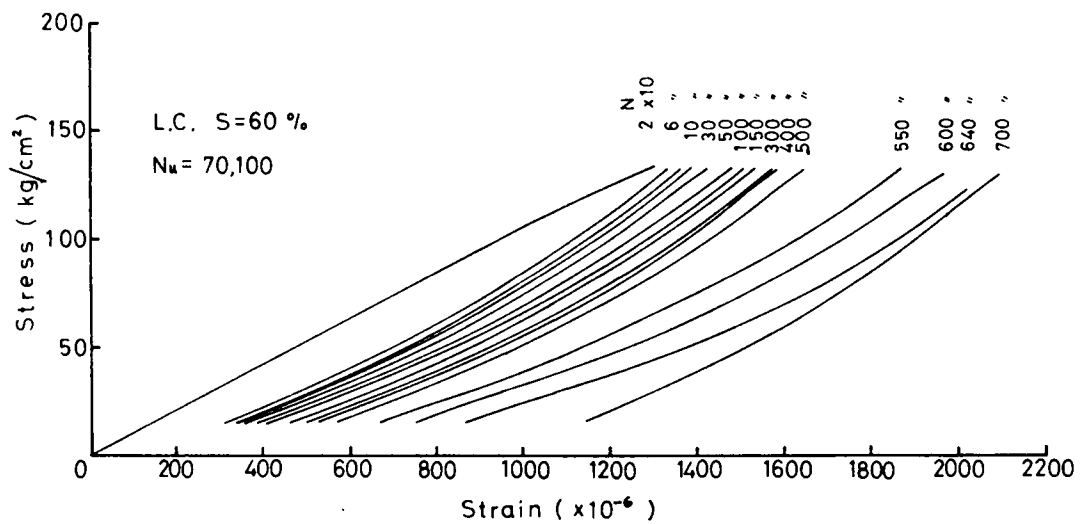


図-6・18 繰返し荷重下における応力-ひずみ曲線

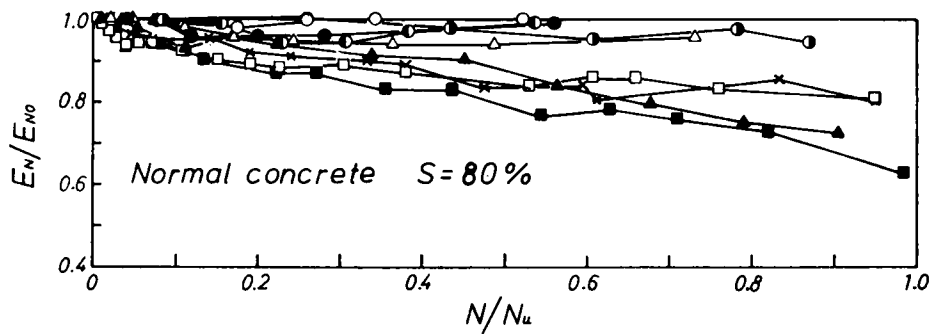


図-6・19 繰返し荷重下における弾性係数の変化

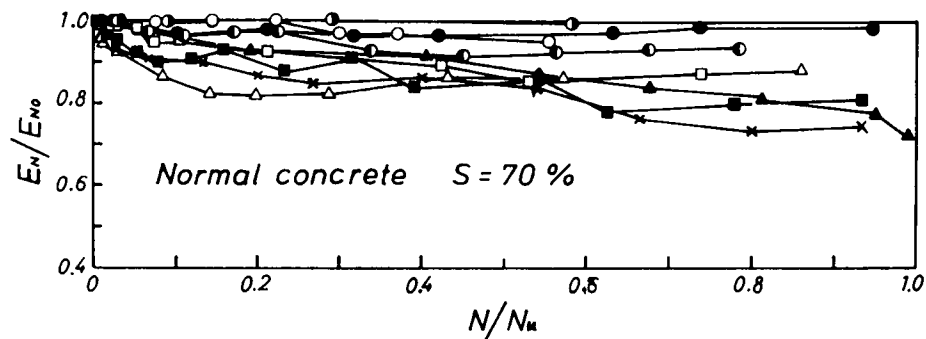


図-6・20 繰返し荷重下における弾性係数の変化

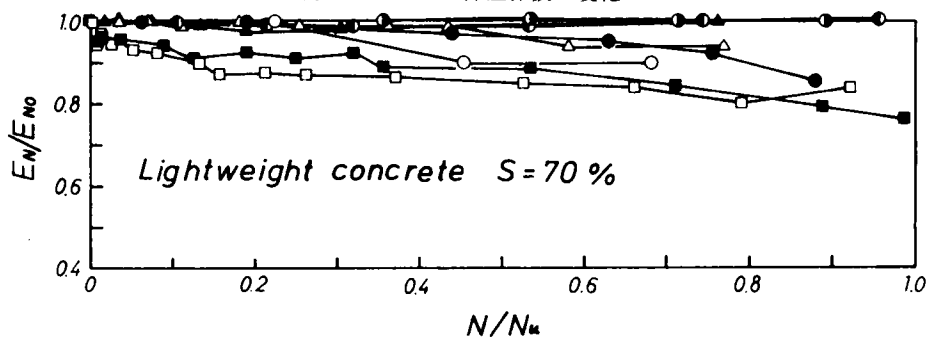


図-6・21 繰返し荷重下における弾性係数の変化

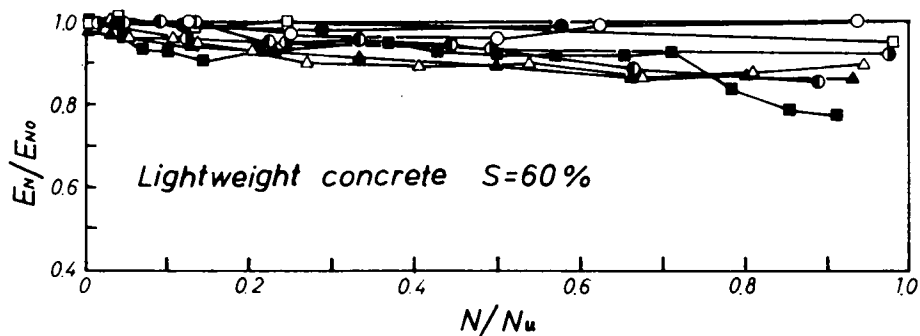
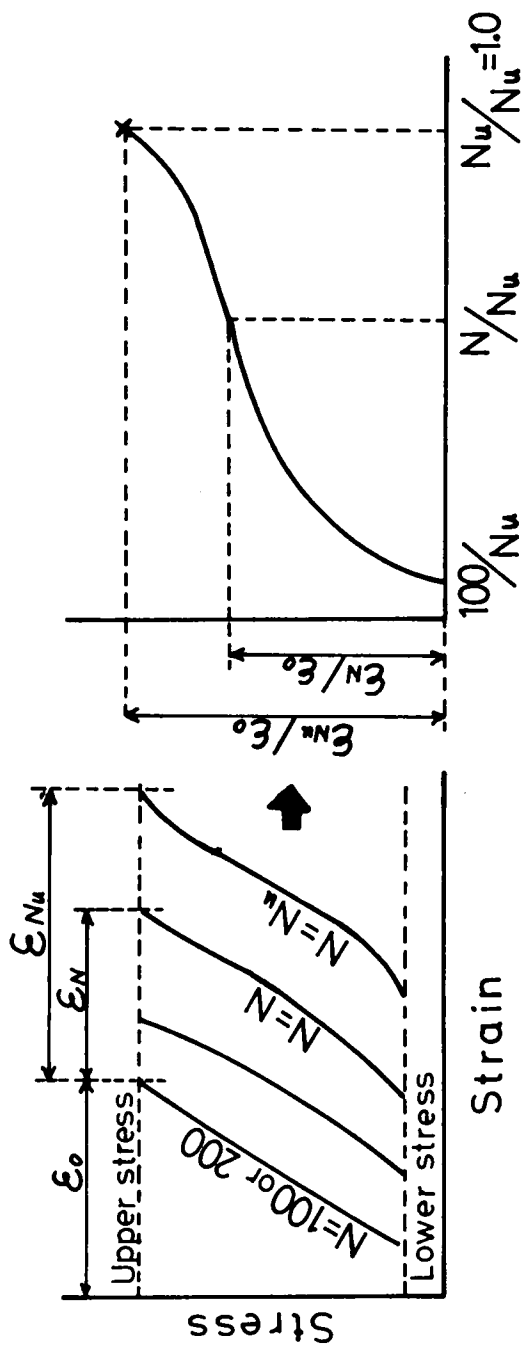


図-6・22 繰返し荷重下における弾性係数の変化



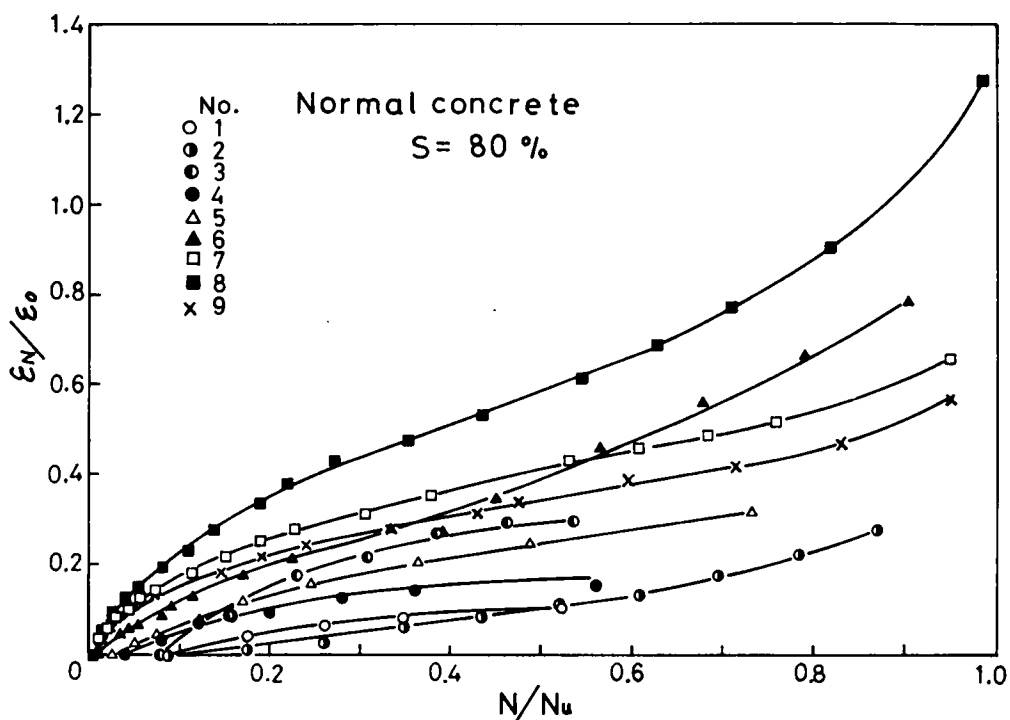


図-6・24 上限応力時のひずみと時間との関係

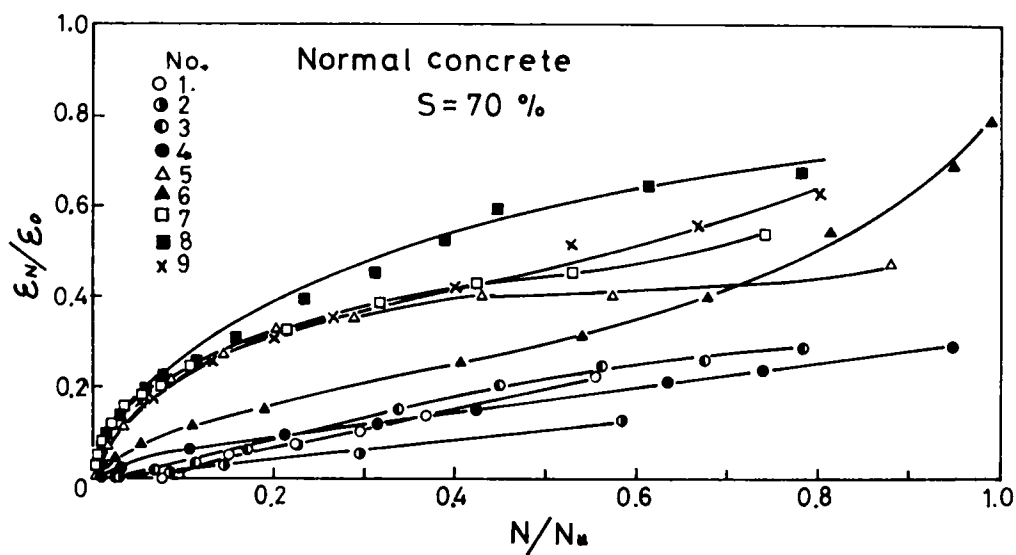


図-6・25 上限応力時のひずみと時間との関係

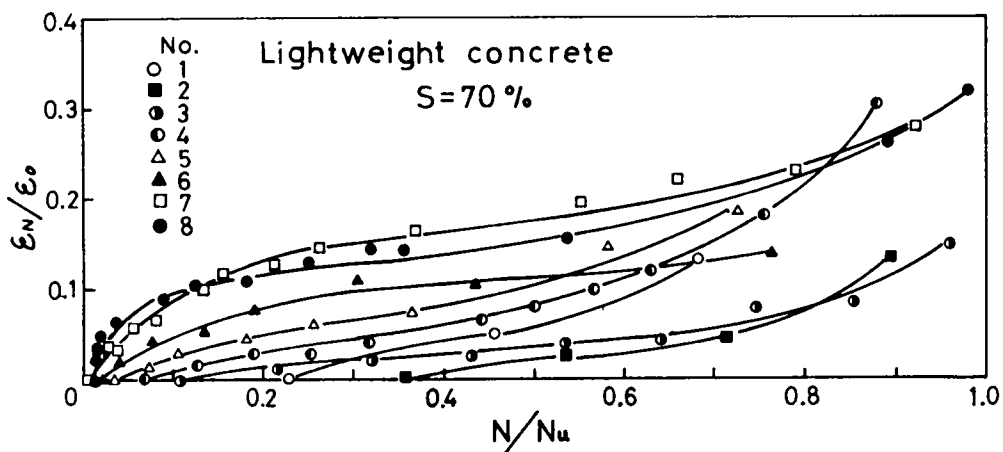


図-6・26 上限応力時のひずみと時間との関係

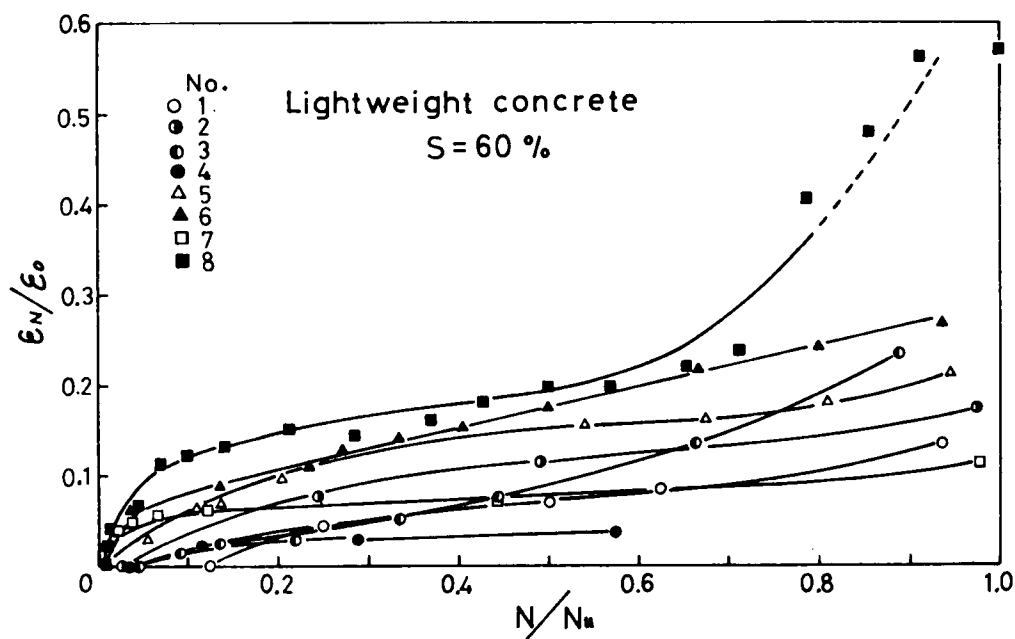


図-6・27 上限応力時のひずみと時間との関係

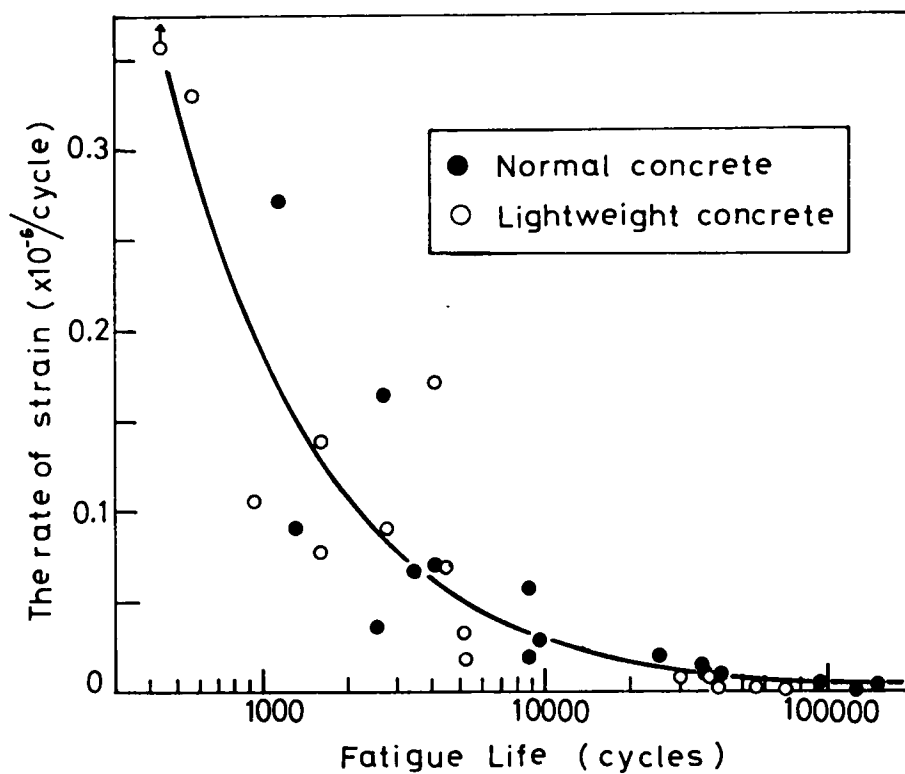


図-6・28 定常領域におけるひずみ速度と疲労寿命との関係

第7章 結論および謝辞

本研究はコンクリートの有する変形および破壊挙動のうち、乾燥収縮やクリープなどの時間的塑性変形と持続および繰返し荷重下における時間的に遅れを有する破壊、すなわちクリープ破壊や疲労破壊を、その内部機構との関連において明らかにすることを目的とし、一連の実験を実施することによって検討したものである。以下に本研究により得られた結果を総括して本論文の結論とするとともに今後の問題点についてもふれる。

本論文では、まず第1章において本研究の目的と工学上の意義を明らかにし、第2章において本研究に直接関係する既往の研究を紹介するとともに本研究の位置づけを行なった。

第3章では、コンクリート構造物の変形挙動に重大な影響をおよぼす乾燥収縮の問題を採り上げ、主にその原因となる内部機構について検討した。

まずコンクリートの乾燥収縮に影響をおよぼす要因のうち、生成機構を考察する際にとくに重要と思われる環境の湿度条件、コンクリート中の骨材の吸水量などの要因に注目し、乾燥収縮ひずみおよびコンクリート中の水分の外部への逸散量を測定した。

その結果、コンクリートの乾燥収縮は環境の湿度が低いほど大きくなること、表面を被覆した供試体の乾燥収縮の方が表面を被覆しない供試体の乾燥収縮よりも小さいこと、さらには水中ではほとんど乾燥収縮しないことなどが明らかになった。また100日程度の測定においては、吸水量の多い骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮の方が吸水量の少ない骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮よりも小さくなった。

コンクリートの乾燥収縮はコンクリートを構成するセメントペースト中のゲル空げきに存在するゲル水が乾燥によって逸散し、その結果セメントゲルが収縮することに起因すると考えられているが、前述の実験結果はすべてそのことを裏付けるものである。しかしながら、コンクリートの乾燥収縮がコンクリート中の水分の外部への逸散に起因するものであることをより厳密に検討するためには、水分の逸散を定量的に把握する必要があると考えられる。このような観点より、本研究においては乾燥に伴うコンクリートの重量の減少を水分の逸散によるものと考えて測定した。その結果、乾燥に伴う水分の逸散は環境の湿度が低いほど多く、骨材中に多量の水分を有するコンクリートほど多くなった。

コンクリート中の水分は、その存在形態によって、化学的結合水、ゲル空げき中のゲル水、毛細管空げき中のキャピラリー水および骨材中の遊離水の4種類に分類される。このうち化学的結合水は乾燥によって失われることなく、逸散するのはそれ以外の水である。

実験によって求められた逸散水の中には、これら種々の形態の水が含まれており、逸散する水の種類により乾燥収縮ひずみにおよぼす影響も異なる。従って水分の逸散の時間的な変化や場所的（供試体各部）な変化の状況を詳しく検討する必要がある。

水分の逸散が拡散方程式に従うと仮定し、本研究の実験条件に合わせて3次元の拡散方程式を解き、それに逸散水量の測定結果を適用することにより、乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散の様相を理論的に検討した。また逸散水量と乾燥収縮ひずみとの関係を求め、それらの結果をもとに乾燥収縮の生成機構を明らかにした。

すなわち、乾燥の初期においては供試体表面からの水分の蒸発が盛んで、骨材中の水分や供試体表面に近い毛細管空けき中の水分が主に逸散し、逸散水量が多いにもかかわらずひずみはそれほど増大しないが、乾燥が進むと供試体表面の湿度は十分に低くなり、供試体表面と内部との湿度勾配は大きくなりセメントゲル中のゲル水が逸散するようになるため、水分の逸散に伴うひずみの増大の割合は大きくなることを明らかにした。

コンクリートの乾燥収縮について、従来は定性的に説明されていたことを、上述のように定量的に明らかにすることができたことは本研究の成果であると考ええる。

第4章では、乾燥収縮と同様にコンクリートの時間的な塑性変形の一つであるクリープの問題について検討した。ここで対象とするのは、静的強度の約30%程度の低応力下におけるクリープで、破壊にいたるような高応力下のクリープについては第5章で論じた。

まずコンクリートのクリープの原因として従来より提唱されている諸説を紹介し、その長所欠点を論じた。つぎに、クリープの環境湿度依存性について検討した。その結果、環境の湿度が低いほどクリープひずみは大きくなること、吸水量の多い軽量骨材を用いたコンクリートのクリープひずみの湿度による変化は他のコンクリートよりも小さいことなどが明らかになり、コンクリートのクリープが乾燥収縮の場合と同様にコンクリート中の水分の量とその時間的な挙動に支配されることを示した。しかし乾燥収縮は湿度100%においては観察されなかったが、クリープひずみは湿度100%においてもみとめられ、シーページ現象に起因するひずみのみならず、他の原因によるひずみも含まれていることを明らかにした。さらに、コンクリートのクリープひずみと逸散水量との関係を検討した結果、両者の関係は直線ないしはそれに近い曲線で表わされ、乾燥状態にあるコンクリートの圧縮クリープ現象を説明する場合にはコンクリート中の水分の外部への逸散が重要な要因になることを示唆した。このような観察をもとに、コンクリートの圧縮クリープひずみをベーシッククリープとドライイングクリープの二つに大別できることを明らかにし、ベーシッククリープが遅延弾性による回復性のひずみと持続荷重によってコンクリート中に発生したマイクロクラックに起因する非回復性のひずみとからなること、ドライイングクリープがシーページ効果に起因する

ものであることを明らかにした。

以上に述べたコンクリートの乾燥収縮やクリープに関する研究は、コンクリートの変形量や逸散水量といった比較的マクロな現象をもとにし、セメントゲルの変形にまでおよぶミクロな生成機構を考察しており、それによって明らかにされることにはおのずから限界があると思われる。コンクリートのこの種変形特性の生成機構をより深く検討するためには本研究をも含め、従来の研究では余りなされることのなかったセメント化学や熱力学などの知識にもとづいた、従来とは違った面からの検討が望まれるであろう。

つぎに、第5章および第6章においては、コンクリートの時間的に遅れを有する破壊について検討した。

まず第5章では、高持続荷重下の破壊すなわちコンクリートのクリープ破壊の問題を採り上げた。

静的強度の80～90%程度の持続荷重下においてもコンクリートが破壊にいたることは古くから知られている。しかしこの種クリープ破壊の問題は、工学上重要な問題であるにもかかわらず、セメントペーストやモルタルの曲げクリープ破壊につき若干検討されている程度で、コンクリートを対象として行なわれた研究は皆無に近い状態である。それは、実験に長時間を要することやそこから得られる結果が著しくばらつき、その取扱いが難しいことによるものと思われる。

本研究は、破壊の面から見たコンクリートのクリープ特性を把握することを主眼として、普通コンクリートおよび軽量コンクリートの高持続荷重下における圧縮クリープ試験を行なったものである。また破壊に要する時間のばらつきのように、その時間的な推移が確率的である現象は確率過程の問題として取扱うべきであるとの観点に立ち、従来より金属材料のクリープ破壊および疲労の問題において高度に発達した確率論的な手法をコンクリートの場合に適用することにより、若干の検討を行なった。

その結果、高持続荷重下におけるコンクリートのクリープ変形は、変形速度が時間とともに減少する遷移クリープ部分、時間に無関係に一定かつ最小となる定常クリープ部分および変形速度が次第に増大してついに破壊にいたる加速クリープ部分の三つの部分からなることを明らかにした。また遷移クリープ段階においてすでに破壊に結びつき得るような重大な損傷が始まっていること、普通コンクリートと軽量コンクリートではその変形特性が若干異なることを両者の材料特性の相違より明らかにした。

コンクリートのクリープ破壊の確率的な性質として、同一応力比における破壊に要する時間の分布が対数正規分布すること、さらに破壊の推移確率が時間とともに低下することを示した。また上記の各クリープ段階に要する時間の分布も対数正規分布することを明らかにし、各クリープ段階においてその確率的な性質に差のないことを示した。

最後に、定常クリープ速度と破壊に要する時間との間に密接な関係が存在することを示すとともに、クリープ限の存在の有無につき確率論的に検討した。

クリープ限については議論の分れるところであるが、著者は普通コンクリートおよび軽量コンクリートのクリープ限を、それぞれ静的強度の84.5%および83.8%と決めた。

第6章では、静的強度以下の繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労破壊について検討した。コンクリートのこの種の性質も、クリープ破壊の場合と同様本来確率論的な性質であるとの観点に立って論じた。

本研究において実施した普通および軽量コンクリートの圧縮疲労試験の結果によれば、破壊までの荷重繰返し回数すなわち疲労寿命は同一応力比においても著しくばらつき、その分布は対数正規分布することが明らかになった。また実験より得られたS-N線図より推定される200万回疲労強度は普通コンクリートと軽量コンクリートでかなりの差があることが明らかになった。この普通および軽量コンクリートの疲労強度の差を両者の材料特性の相違との関連において検討した結果、両者の疲労破壊特性の相違は主にその骨材強度の相違に起因するものであるとの見解を得た。またコンクリートの疲労破壊の内部機構が金属材料のそれと異なることを確率論的に検討した。その結果、金属材料の疲労破壊は材料内部の損傷の累積によっておこると考えられ、疲労寿命の分布はポアソン分布ないしはガンマー分布するが、コンクリートの疲労破壊現象は、その疲労寿命の分布から考え、材料内部の損傷の累積によるものではなく、たとえいくつかの種類のちがう速度過程が継続しておこるものであるとしても、そのうちの一つの過程が時間的に支配的な部分を占める律速過程を有する破壊であるとの見解を得た。

つぎに繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性を検討した。その結果、繰返し荷重下におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線は、最初は上に凸な状態から、直ちに直線ないしは下に凸な曲線に変わり、破壊近くなるとS字形になることが明らかになった。また、その弾性係数は荷重の繰返しとともに低下することを示した。

最後に繰返し荷重の上限値におけるひずみの時間的な変化を検討した結果によれば、その上限ひずみは、持続荷重下の変形特性と同様、遷移領域、定常領域および加速領域の三つの部分に分けられ、さらに定常領域のひずみ速度と疲労寿命の間には密接な関係があることが明らかになった。

以上第5章および第6章で論じたクリープ破壊および疲労破壊の問題は、その変形特性および破壊の確率論的な性質から考え、ほぼ同一の破壊現象であると考えられる。そういった見地からコンクリートのこの種の問題を総合的に検討することが今後の研究として望まれるであろう。さらにはコンクリートの微視的な材料特性との関連において疲労破壊の問題を論じることも必要であると考ええる。

本研究は著者が京都大学に在学中および鳥取大学に助手として在勤中に行ない、すでに土木学会論文報告集および「材料」に発表したものに今回若干の実験を追加し、新たにとりまとめたものである。

本研究を実施するにあたり、終始変らず御指導、御教示下さり、また本論文をまとめる機会をお与えいただきました京都大学教授岡田清博士ならびに鳥取大学教授西林新蔵博士に対し衷心より厚く御礼申し上げます。本研究がコンクリートのこの方面の今後の研究の一助となるならば、著者にとってこの上もない喜びであり、それはひとえに両先生の御指導の賜である。

また研究の途上において数々の御教示をいただきました鳥取大学の木山英郎先生ならびに京都大学の小柳治先生、有益な討議をお寄せいただきました鳥取大学の野田英明先生に心より御礼申し上げます。

さらに実験の遂行および文献の収集において多大の御助力を下さいました京都大学の矢村潔氏ならびに鳥取大学の井上正一氏をはじめとする材料研究室の諸兄に対して深甚の謝意を表する次第である。

昭和51年6月

阪 田 憲 次